



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

JARKKO PIIRONEN

**VAKIOTEHOISEN KUIVANAPITOLÄMMITYKSEN VAIKUTUS HIRSIMÖKKIEN
LÄMPÖ- JA KOSTEUSTEKNISEEN TOIMINTAAN**

Diplomityö

Tarkastajat:
Professori Ralf Lindberg
Dosentti Juha Vinha

Aihe ja tarkastajat hyväksytty:
10. syyskuuta 2009

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennetun ympäristön tiedekunta

Rakennustekniikan koulutusohjelma

PIIRONEN, JARKKO: Vakiotehoisen kuivanapitolämmityksen vaikutus hirsimökkien lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan

Diplomityö, 78 sivua + 16 liitesivua

Syyskuu 2010

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastajat: Professori Ralf Lindberg, Dosentti Juha Vinha

Avainsanat: Ekotehokkuus, energiatehokkuus, kuivanapitolämmitys, vapaa-ajan asunto

Tampereen teknillisellä yliopistolla on tutkittu uudentyyppistä energiatehokasta kuivanapitolämmitystä, joka soveltuu epäjatkuvaan käytössä olevien vapaa-ajan asuntojen lisäksi mahdollisesti mm. maatalous- ja teollisuusrakennuksiin. Tässä tutkimuksessa kuivanapitolämmitystä testattiin kuitenkin ainoastaan lisäeristämättömissä massiivihirsirakenteisissa vapaa-ajan asunnoissa. Tutkimus tehtiin vuosina 2007–2010 ja se koostui seitsemässä koekohteesta suoritetuista lämpö- ja kosteusmittauksista sekä laskentatarkasteluista. Laskentatarkasteluilla selvitettiin kuivanapitolämmityksen vaatimaa lämmitystehoa sekä vapaa-ajan asuntojen ala- ja yläpohjarakenteiden toimintaa. Laskentatarkastelujen pohjalta luotiin malli, jota voidaan käyttää määrittämään vapaa-ajan asunnon ominaisuuksien perusteella asunnolla tarvittava lämmitysteho.

Kuivanapitolämmityksen toiminta perustuu siihen, että lämmitysenergiankulutusta minimoidaan lämmittämällä asuntoa sen käyttöajan ulkopuolella vain tarvittavassa määrin. Kuivanapitolämmityksessä asunnon sisälämpötilaa ei pidetä vakiona vaan ainoastaan ulkolämpötilaa muutaman asteen korkeampana ja siten asunnon sisälämpötila seuraa ulkolämpötilan muutoksia. Kuivanapitolämmityksen yksinkertainen malli, vakioteholämmitys, sallii asunnon sisälämpötilan laskea myös pakkasen puolelle.

Tulosten perusteella lämmittämättömien vapaa-ajan asuntojen sisäolosuhteet eivät näyttäisi olevan vielä nykyisessä ilmastossa sellaisia, että asuntojen lämmittäminen olisi välttämätöntä, mutta rakenteiden toimivuus saattaa edellyttää lämmittämistä. Mökin alapohjarakenne määrää yleensä lämmitystarpeen suuruuden. Vapaa-ajan asunnon lämmittäminen on suositeltavaa erityisesti silloin, jos asunnolla on heikosti tuulettuva ryömintätilainen alapohja, jossa on hyvin tiivis höyrynsulkukerros. Tällöin asunnon lämmitystarve vaihtelee 3–5 °C välillä riippuen rakenteesta, höyrynsulkumateriaalista, tuuleutuksesta sekä maapohjasta. Tuulettuvien yläpohjien, puurankarakenteisten seinien, maanvaraisen betonilaatan ja hyvin tuulettuvan ryömintätilaisen alapohjan kohdalla 0–3 °C lämpötilaero on riittävä, mikäli rakenteet ovat oikeaoppisesti toteutettu ja ulkopuoliset tekijät eivät vaikuta oleellisesti rakenteiden kosteustekniseen toimintaan.

Lämmittämättömänä pitämiseen nähden kuivanapitolämmitys parantaa tilannetta asunnon sisäolosuhteiden ja rakenteiden säilyvyyden osalta. Tietyillä rajoituksilla myös peruslämpö voidaan korvata kuivanapitolämmityksellä ja pienentää siten lämmitysenergian kulutusta ilman että kosteusriskit kasvavat. Tämä edellyttää mm. vesikalusteilta ja -laitteistoilta pakkasenkestävyyttä tai muita erillisjärjestelyjä, joilla estetään alhaisten lämpötilojen aiheuttamat kosteusvauriot. Kuivanapitolämmitystä voidaan myös modifioida vakiotehoisesta ratkaisusta kehittyneemmäksi kuivanapitolämmitykseksi, mikä lisäisi lämmitystavan soveltuvuuskohteita ja mahdollistaisi lämmitysenergiankulutuksen vähentämisen entisestään.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

The Faculty of Built Environment

Master's Degree Programme in Civil Engineering

PIIRONEN, JARKKO: Constant output heating and its effect on the hygrothermal performance of log summer houses

Master of Science Thesis, 78 pages + 16 appendix pages

September 2010

Major: Structural Engineering

Examiners: Professor Ralf Lindberg, Docent Juha Vinha

Keywords: Constant output heating, eco-efficiency, energy efficiency, summer house

Energy efficient constant output heating which can be utilised in part-time residences or summer houses, and possibly in agricultural and industrial buildings, has been studied in the Tampere University of Technology. However, in this study constant output heating was only tested in log summer houses made without any additional thermal insulation in the walls. The study was conducted during the years 2007–2010 and it consisted of field measurements in seven test houses and calculation examinations. The heating output required by the heating system and the hygrothermal performance of typical floor and roof structures in the summer houses were clarified with the help of the calculation examinations. In addition, the examinations served as a source for a calculation model which can be used to determine the heating output on the basis of the properties of the summer house.

With constant output heating, the heating energy consumption is minimised when the house is not in use by warming the apartment only as little as is necessary. With the heating system, the indoor temperature of the apartment is not kept constant, but only a few Celsius degrees higher than the outdoor temperature. A simple model of constant output heating allows the indoor temperature to decline to below zero centigrade, which can limit its use.

The results of the study indicate that the indoor conditions of unheated summer houses are not, at least in the present climate, so critical that the heating of those houses would be necessary, but the performance of the envelope structures may need it. The base floor structure of a summer house usually determines the amount of heating need. It is recommended to keep the summer house heated, especially if there is a floor with a poorly ventilated crawl space, and the structure contains a tight vapour barrier. In that case, the heating need varies between 3–5 °C, depending on the structure, vapour barrier, ventilation, and ground cover. As regards vented roofs, timber-framed external walls, concrete slab on the ground structures, and floors with a well ventilated crawl space, a 0–3 °C temperature difference is sufficient, if these structures are properly built and the external factors do not essentially affect their moisture performance.

Constant output heating is a better option than keeping the summer house unheated, and it improves the situation with respect to the indoor conditions and the performance envelope structures. With certain restrictions, conventional heating, which keeps the indoor temperature constant, can be replaced with constant output heating, and thus the heating energy consumption can be reduced without increasing the risk of moisture damage. This may require for instance frost proof water systems or other arrangements, which prevent moisture damage caused by low temperatures. It is also possible to develop constant output heating into an advanced system, which would expand its applications and make it even more energy efficient.

ALKUSANAT

Diplomityö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) Rakennustekniikan laitoksella diplomi-insinöörintutkinnon opinnäytetyönä. Työ liittyy laitoksella tehtyyn Ekotehokas rakennusten epäjatkuva lämmitys (EREL) -tutkimukseen, joka oli puolestaan osa laajempaa ympäristöklusterin rahoittamaa Vapaa-ajan asumisen ekotehokkuus (VAPET) -hanketta. Työssä on käsitelty EREL -tutkimuksessa saatuja tuloksia.

EREL -tutkimus alkoi keväällä 2007 ja päättyi vuoden 2009 lopulla. Tutkimus tehtiin TTY:n talonrakennustekniikan laboratoriossa tekniikan tohtori Juha Vinhan johdolla. Allekirjoittaneen lisäksi kenttämittauksissa ja muissa tutkimusjärjestelyissä ovat olleet mukana tutkijat Minna Korpi ja Kati Salminen.

Haluan kiittää Juha Vinhaa työn ohjaamisesta ja työkavereita mukavan piristävästä työilmapiiristä. Suurimman kiitoksen ansaitsee kuitenkin vaimoni Anne, joka saa minut jaksamaan ja iloitsemaan uusista päivistä.

Tampereella 1.9.2010

Jarkko Piironen

SISÄLLYS

Termit ja lyhenteet.....	3
1 Johdanto	5
2 Teoria	6
2.1 Homemalli	6
2.2 Vapaa-ajan asuntojen sisäolosuhteet ja kuivanapitolämmitys	8
2.2.1 Vapaa-ajan asuntojen sisäolosuhteet	8
2.2.2 Tavoiteltavat sisäolosuhteet	10
2.2.3 Kuivanapitolämmitys ja sen toiminta	11
2.2.4 Kuivanapitolämmityksen lämmitystehoon vaikuttavat tekijät	15
2.2.5 Vapaa-ajan asuntojen vaipparakenteiden toiminta	16
3 Kenttämittaukset.....	18
3.1 Kenttämittausten suoritus	18
3.1.1 Kenttämittausten tavoitteet ja laajuus	18
3.1.2 Koekohteet	18
3.1.3 Ilmatiiviyden mittaaminen	20
3.1.4 Lämpötila- ja kosteusmittaukset	20
3.2 Ilmatieteen laitoksen data ja mittausvuosien kriittisyys	22
3.3 Kenttämittaustulokset	25
3.3.1 Koekohteiden sisäiset erot eri tarkastelupisteiden välillä	25
3.3.2 Koekohteiden väliset erot	28
3.3.3 Sisäilman kosteussisällöt	32
3.3.4 Vakioteholämmityksen vaikutus sisäilmassa ja ikkunapinnalla	33
3.3.5 Vierailujen vaikutus	35
3.3.6 Auringonsäteilyn vaikutus	36
3.3.7 Tuulen vaikutus	40
3.4 Mittaustulosten yhteenveto	44
3.4.1 Lämmittämättömät koekohteet	44
3.4.2 Kuivanapitolämmitetyt koekohteet	44
3.5 Kenttämittauksiin liittyviä epävarmuustekijöitä	45
4 Laskentatarkastelut	46
4.1 Laskentatarkastelujen tavoitteet ja WUFI Pro 4.2 -ohjelma	46
4.2 Laskentatarkastelujen suoritus	47
4.2.1 Tuuletettujen puu-ulkoseinärakenteiden suunnittelumenetelmä	47
4.2.2 Laskennan suoritus	47
4.2.3 Rakenteet	48
4.2.4 Rakenteissa käytetyt materiaalit	50
4.2.5 Ulko- ja sisäilmaolosuhteet	52
4.2.6 Ryömintätilan olosuhteet	55
4.3 Laskentatulokset	57
4.3.1 Yläpohjarakenteet	57
4.3.2 Alapohjarakenteet	59
4.4 Laskentatarkastelujen johtopäätökset	61
4.5 Laskentatuloksiin liittyvät epävarmuustekijät	62

5	Lämmitystehon määrittäminen	64
5.1	Lämmitystehon määrittämiseen käytettävän mallin lähtökohdat	64
5.2	Lopullinen malli	66
5.3	Mallin mukaisen lämmitystehon vertailu	67
5.3.1	Vertailu koekohteissa mitattuihin lämmitystehtäviin	67
5.3.2	Vertailu rakentamismääräyskokoelman D5 mukaisiin lämmitystehtäviin	68
5.4	Mallin epävarmuustekijät ja jatkokehittäminen	69
6	Johtopäätökset	71
6.1	Vakiotehoisen kuivanapitolämmityksen edut ja rajoitteet	71
6.2	Kuivanapitolämmityksellä tavoiteltava lämpötilaero	72
6.3	Kuivanapitolämmityksen eri toteuttamistavat	74
6.4	Jatkotutkimustarve	74
	Lähteet	76
	Liitteet	78

TERMIT JA LYHENTEET

Dataloggeri	Ohjelmoitava, lämpötilaa ja suhteellista kosteutta itsenäisesti mittaava mittauslaite. Tässä työssä laitteesta käytetään myös lyhennystä loggeri.
Diffuusio	Diffuusio on kaasumolekyylien liikettä, joka pyrkii tasoittamaan kaasuseoksessa olevien yksittäisten kaasujen pitoisuuseroja (tai osapaine-eroja). Diffuusiosta kaasu siirtyy korkeammasta pitoisuudesta matalampaan pitoisuuteen.
EREL	Ekotehokas rakennusten epäjatkuva lämmitys -tutkimus, joka oli osa Vapaa ajan asumisen ekotehokkuus (VAPET) -hanketta
FMI	Ilmatieteen laitos
Homemalli	Matemaattinen laskentamalli, joka määrittää homeen kasvuriskin tarkasteltavalla materiaaalipinnalla malliin syötetyissä lämpötila- ja kosteusolosuhteissa.
Höyrynsulku	Tarkoittaa ainekerrosta, jonka pääasiallinen tehtävä on estää haitallinen vesihöyryn diffuusio rakenteeseen tai rakenteessa. Höyrynsulku toimii usein samaan aikaan myös ilmansulkuna.
Ilmavuotoluku, n_{50}	Luku, jolla kuvataan rakennuksen ilmatiiviyttä. Luku kertoo kuinka monta kertaa rakennuksen ilmatilavuus vaihtuu vaipan läpi tunnin aikana paine-eron ollessa 50 Pa.
Kondensoituminen	Ilman sisältämän vesihöyryn tiivistyminen esim. rakenteiden tai huonekalujen pinnoille. Esiintyy, kun ilman vesihöyrypitoisuus saavuttaa kyllästyskosteuspitoisuuden (eli 100 %:n suhteellisen kosteuden).
Konvektio	Kaasun tai nesteen virtausta ulkoisten voimien (pakotettu konvektio) tai lämpötilaeroista aiheutuvien tiheyserojen vaikutuksesta (luonnollinen konvektio). Ilmavirtauksen mukana siirtyy samalla myös lämpöenergiaa ja vesihöyryä.
Kuivanapitolämmitys	Lämmitystapa, jossa rakennuksen kosteusolosuhteet pidetään suotuisalla tasolla siten, että sisälämpötila pysyy muutaman asteen ulkolämpötilaa korkeampana. Yksinkertaisessa mallissa rakennuksen sisälämpötila voi laskea myös pakkasen puolelle.
Kyllästyskosteuspitoisuus	Vesihöyrypitoisuuden maksimiarvo, joka ilmassa voi olla vallitsevassa lämpötilassa.
U-arvo	Lämmönläpäisykerroin, joka ilmoittaa jatkuvuustilassa rakennusosan pinta-alayksikön läpäisevän lämpövirrantiheyden, kun lämpötilaero rakenneosan eri puolilla on yhden lämpötilayksikön suuruinen. Lämmönläpäisykerroin ilmoitetaan yleensä yksikössä $W/(m^2\text{°C})$ tai $W/(m^2\text{K})$.
Painekoemenetelmä	Menetelmä, jolla mitataan rakennusvaipan ilmatiiviyys sisä- ja ulkoilman välille aikaansaadun paine-eron avulla.

Rakennusvaippa	Rakenteet, jotka erottavat rakennuksen sisätilan ulkoilmasta.
RakMK	Suomen Rakentamismääräyskokoelma
Suhteellinen kosteus	Ilman sisältämän vesihöyrypitoisuuden suhde vallitsevan lämpötilan määräämään kyllästyskosteuspitoisuuteen.
Tasapainokosteustila	Vallitsevista olosuhteista riippuva kosteuspitoisuus, jonka materiaali pyrkii saavuttamaan joko sitomalla tai luovuttamalla kosteutta.
Vapaa-ajan asunto	Tässä tutkimuksessa vapaa-ajan asunnolla tarkoitetaan kesämökkiä tai vastaavaa rakennusta, jota ei ole tarkoitettu jatkuvaan asumiskäyttöön.
VAPET	Vapaa ajan asumisen ekotehokkuus -tutkimushanke
Vesihöyrypitoisuus	Vesihöyryn määrä ilmassa, joka ilmoitetaan yleensä yksikössä grammaa yhtä ilmakeuutiometriä kohden. Vesihöyrypitoisuuserot pyrkivät tasoittumaan diffuusion avulla.

1 JOHDANTO

Suomessa on jo lähes puoli miljoonaa vapaa-ajan asuntoa ja niiden määrä kasvaa edelleen. Energiatilasto 2008 (2009) arvioi vapaa-ajan asuntojen vuosittaisen sähkönkulutuksen olleen 535 GWh vuonna 2007. Kotitalouksien sähkönkäyttö 2006 -tutkimuksessa (2008) kuitenkin ilmeni, että vapaa-ajan asuntojen sähkönkulutus, ottaen huomioon myös niiden yhteydessä olevat talousrakennukset, saattaa olla jopa 500 GWh tilastoitua suurempi, jolloin kulutus edustaisi noin 10 %:a sekä kotitalouksien sähkölämmityksen että kotitaloussähkön kokonaismäärästä.

Nykyään noin kolme neljäsosaa vapaa-ajan asunnoista on sähköistettyjä. Vapaa-ajan asuntojen laatu- ja varustetaso kasvaa myös jatkuvasti ja monet asunnoista tehdään ns. kakkosasunnoiksi, jolloin niitä käytetään yhä enemmän myös syys-, talvi- ja kevätaikaan. Asunnon käyttömukavuuden parantamiseksi ja asunnon kaluston ja irtaimiston suojelemiseksi, asuntoa lämmitetään yhä enemmän varsinaisen käyttöajan ulkopuolella. Vaihtoehtoisten lämmitysratkaisujen puuttuessa mökille valitaan yleensä peruslämpö, vaikka rakenteiden, kalusteiden ja irtaimiston säilyvyys voitaisiin monissa tapauksissa varmistaa huomattavasti vähäisemmällä lämmittämällä ja peruslämpöön nähden pienemmällä energiakulutuksella. Eräs peruslämpöä ekotehokkaampi lämmitystapa on ns. kuivanapitolämmitys, jonka soveltuvuutta vapaa-ajan asuntoihin on tutkittu Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitoksella vuosien 2007–2010 aikana.

Rakennustekniikan laitoksen kuivanapitolämmitykseen keskittyvä Ekotehokas rakennusten epäjatkuva lämmitys (EREL) -tutkimus oli osa laajempaa Ympäristöklusterin rahoittamaa Vapaa-ajan asumisen ekotehokkuus (VAPET) -tutkimushanketta. VAPET -hanke tarkasteli vapaa-ajan asumista kestävästä kulutuksesta ja ekotehokkuudesta kannalta pyrkien löytämään ja kehittämään vaihtoehtoisia teknologioita, palveluita ja käytäntöjä, jotka mahdollistaisivat mökkeilyn ekotehokkuuden parantamisen. Hankkeessa koottiin yhteen useita ekotehokkuuden parantamiskeinoja ja -mahdollisuuksia, jotka liittyivät mm. mökkien vaikutuspiirissä olevan infrastruktuuri- ja palvelurakenteen ja osa-aikaiseen asumiseen soveltuvien lämmitys-, vesi-/ jätehuoltojärjestelmien kehittämiseen sekä asuntojen omistajien käyttäytymistottumuksiin vaikuttamiseen.

EREL -tutkimuksen päätavoitteena oli puolestaan selvittää vapaa-ajan asuntojen sähkönsäästömahdollisuuksia vakiotehoisen kuivanapitolämmityksen avulla ja antaa ohjeita lämmitykseen ja kosteusongelmien välttämiseen. Tutkimus koostui kenttämittauksista, vaipparakenteiden laskentatarkasteluista ja kuivanapitolämmityksen vaatiman lämmitystehon suuruuden arvioimisesta.

Kenttämittauksilla (luku 3) selvitettiin tyypillisten massiivihirsirakenteisten mökkien lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa sekä pyrittiin määrittämään kosteusongelmien esiintymisen kannalta kriittiset olosuhteet. Mittauksilla saatiin lisäksi tietoa tyhjillään olevien vapaa-ajan asuntojen olosuhteista sekä kuivanapitolämmityksen hyödyistä ja mahdollisista ongelmista ja haitoista. Kenttämittauksissa, jossa oli mukana yhteensä seitsemän koekohdetta, tarkastelun alla olivat vakiotehoisella kuivanapitolämmityksellä varustettujen vapaa-ajan asuntojen lisäksi lämmittämättömät ja peruslämmöllä olevat asunnot. Kenttämittaustiedon pohjalta tehdyillä laskentatarkasteluilla (luku 4) selvitettiin puolestaan vaipparakenteiden kosteusteknistä toimintaa lämmittämättömissä ja lämmitetyissä vapaa-ajan asunnoissa. Lopuksi kenttämittausten ja laskentatarkastelujen perusteella määritettiin yksinkertaistettu laskentamalli (luku 5), jota voidaan käyttää kuivanapitolämmityksen vaatiman lämmitystehon määrittämiseen.

2 TEORIA

2.1 Homemalli

Tutkimuksen oleellinen osa oli saada tietoa vapaa-ajan asuntojen sisätilojen ja rakenteiden olosuhteista ja siitä, kuinka kriittisiä olosuhteet todellisuudessa ovat. Koska homehtuminen on vapaa-ajan asunnoilla yksi merkittävimmistä turmeltumisilmiöistä, homehtumisriskiä tuli arvioida jollain tavoin. Arviointiin käytettiin alun perin VTT:llä kehitettyä homeen kasvua kuvaavaa matemaattista mallia ns. homemallia, joka kuvaa materiaalipinnan homehtumisherkkyyttä annetuissa lämpötila- ja kosteusolosuhteissa. Malli ottaa huomioon olosuhteiden kriittisyyden, altistumisaajan sekä homeen kasvun kannalta epäsuotuisten olosuhteiden vaikutuksen.

Alkuperäinen homemalli ja sen perustana olevia tutkimustuloksia on esitelty artikkelissa ”A mathematical model of mould growth on wooden material” (Hukka & Viitanen 1999). Alkuperäinen malli soveltui puumateriaalien homehtumisherkkyyden arviointiin muuttuvissa lämpötila- ja kosteusolosuhteissa. Sittemmin mallia on kehitetty ja nykyisin se soveltuu myös muihin rakennusmateriaaleihin. Tässä tutkimuksessa tehdyissä tarkasteluissa käytettiin pääsääntöisesti homemallin viimeisintä versiota, joka on esitetty julkaisussa ”Rakennusmateriaalien ja rakenteiden homehtumisriskin laskennallinen arviointi” (Vinha et al. 2010).

Vanhempaa mallia, joka poikkeaa uudesta mallista mm. pakkasjaksojen vaikutuksen osalta, käytettiin ainoastaan verratessa tutkimuksen aikaisia ulkoilmaolosuhteita aiempien vuosien ulkoilmaolosuhteisiin. Ulkoilmaolosuhteiden kriittisyys arvioitiin vanhalla mallilla, koska vanhalla mallilla tehtyjä laskelmia löytyi kirjallisuudesta ja siten olosuhteiden kriittisyyden vertailu oli mahdollista. Esimerkiksi Vinha (2007) on tarkastellut neljän paikkakunnan ulkoilmaolosuhteiden kriittisyyttä 30 vuoden ajalta vuosina 1971–2001. Ulkoilmaolosuhteiden osalta hometarkastelut tehtiin vastaavalla tavalla käyttäen 24 tunnin laskentaväliä, kun taas uudemmalla mallilla tehdyissä tarkasteluissa käytettiin parannetun mallin edellyttämää yhden tunnin laskentaväliä. Seuraavassa esitetyt yleiset periaatteet koskevat pääasiassa sekä vanhaa että uutta homemallia.

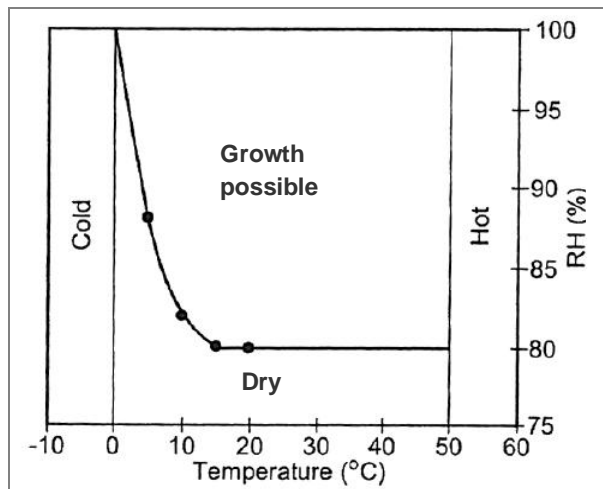
Homemalli kuvaa homeenkasvua tutkittavan materiaalin pinnalla homeindeksillä, joka saa lukuarvoja väliltä 0...6. Arvoasteikko perustuu homeen kasvun visuaalisiin havaintoihin materiaalin pinnalla. Homemallin arvoasteikko ja lukuarvojen merkitykset on esitetty taulukossa 2.1.

Taulukko 2.1 Homeindeksin arvoasteikko.

Homeindeksi	Määritelmä
0	Kasvua ei esiinny
1	Mikroskoopilla havaittavaa vähäistä kasvua
2	Mikroskoopilla havaittavaa huomattavaa kasvua, joka peittää yli 10 % pinnasta
3	Silmin havaittavaa vähäistä kasvua, homeitiöitä alkaa muodostua
4	Silmin havaittavaa kasvua, joka peittää yli 10 % pinnasta
5	Silmin havaittavaa kasvua, joka peittää yli 50 % pinnasta
6	Silmin havaittavaa erittäin runsasta kasvua, joka peittää koko pinnan

Arvolla 0 homeen kasvua ei vielä ole havaittavissa ja arvoilla 1 ja 2 kasvu on havaittavissa vain mikroskoopin avulla. Indeksillä 3 homekasvusto on havaittavissa paljain silmin ja arvot 4, 5 ja 6 määräytyvät sen mukaan, kuinka suuri osuus materiaalin pinnasta on paljain silmin havaittavan kasvuston peitossa. Maksimi-arvolla 6 pinta on kokonaan paljain silmin havaittavan homekasvuston peitossa.

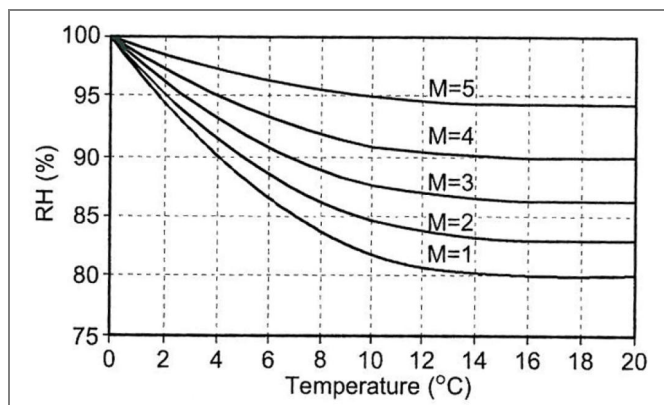
Homeen kasvu edellyttää samanaikaisesti riittävän korkeaa suhteellista kosteutta ja sopivaa lämpötilaa. Kuvassa 2.1 on esitetty homemallin mukaiset homehtumisen kannalta suotuisat olosuhteet.



Kuva 2.1 Homeen kasvulle suotuisat olosuhteet. (Hukka & Viitanen 1999)

Olosuhteet ovat homeelle suotuisat, kun lämpötila on välillä 20...50 °C ja suhteellinen kosteus vähintään 80 % RH. Lämpötilan ollessa välillä 0...20 °C, homehtuminen vaatii 80 % RH:a korkeamman suhteellisen kosteuden kuvan 2.1 mukaisesti. Tällä lämpötila-alueella homehtumisen vaatima ns. kriittinen suhteellinen kosteus kasvaa lämpötilan laskiessa. Erittäin korkea lämpötila hidastaa kasvua tai jopa tuhoaa jo olemassa olevaa homeverkostoa. Todellisuudessa 50 °C:n raja ei ole yhtä selkeä kuin malli antaa olettaa, mutta tavallisesti sisätiloissa tai rakenteissa ei kuitenkaan esiinny näin korkeita lämpötiloja, jolloin kyseinen raja ei ole merkityksellinen.

Olosuhteiden kriittisyys vaikuttavasti siihen, miten nopeasti tai miten korkealle homeindeksi nousee. Esim. 10 °C:n lämpötilassa homeindeksi kasvaa huomattavasti nopeammin 95 %:n suhteellisella kosteudella kuin 85 %:n suhteellisella kosteudella. Kuvassa 2.2 on esitetty esimerkkinä, kuinka korkeaksi puumateriaalin homeindeksi voi kohota tietyissä vakioolosuhteissa.



Kuva 2.2 Puumateriaalissa erisuuruisten homeindeksien saavuttamiseksi tarvittavat suhteelliset kosteudet lämpötilan funktiona (Hukka & Viitanen 1999).

Olosuhteiden ollessa homeen kannalta epäsuotuisat, homeindeksi alkaa laskea eli homehtuminen taantuu. Epäsuotuisien olosuhteiden kesto vaikuttaa osaltaan taantumisenopeuteen. Mikäli olosuhteet ovat epäsuotuisat riittävän kauan, indeksin arvo laskee aina arvoon 0 saakka. Tämä on jossain määrin ristiriidassa todellisuuden kanssa, sillä epäsuotuisat olosuhteet eivät aina poista näkyvää homekasvustoa materiaalin pinnalta. Homeindeksi 0 kuvaa tällöin sitä, että homehymästä ovat kuolleet eikä homeen kasvua tapahdu. Vanha ja uusi homemalli eroavat mm. siinä, että uudemmassa homemallissa on otettu huomioon myös pakkasen aiheuttama taantuma.

Homemallin antama arvio ei kuvaa täydellisesti homeen biologista kasvua, mutta laskentamallin tehtävä on auttaa riskin mahdollisuuden ja suuruusluokan määrittämisessä. Mallin puutteellisuudesta voisi mainita, ettei se ota huomioon esim. materiaalin koostumusta, ikääntymistä tai lian ja muiden homeen kannalta suotuisien ravinteiden esiintymistä, vaikka nämä tekijät voivat todellisuudessa vaikuttaa merkittävästi materiaalin homehtumisherkyyteen. (Vinha et al. 2010)

2.2 Vapaa-ajan asuntojen sisäolosuhteet ja kuivanapitolämmitys

2.2.1 Vapaa-ajan asuntojen sisäolosuhteet

Lämmitetyissä jatkuvassa käytössä olevissa asuinrakennuksissa sisäilma sisältää tavallisesti enemmän vesihöyryä kuin ulkoilma, mikä johtuu asumisen kosteustuotosta ja siitä, että rakennuksen lämmin sisäilma voi sitoa kylmään ulkoilmaan nähden enemmän kosteutta. Vapaa-ajan asunnoissa tilanne on vesihöyrypitoisuuksien suhteen varsin erilainen (ks. kohta 3.3.3), sillä asumisen kosteustuotto on huomattavasti vähäisempää mm. epäjatkuvan käytön johdosta. Käyttämättöminä olevien vapaa-ajan asuntojen sisäolosuhteet riippuvat mm. ulkoilman olosuhteista, lämmityksestä, vaipan ilmatiivyydestä ja lämmön- ja kosteudeneristyskyvystä, ilmanvaihdosta sekä sisäilmaan yhteydessä olevista materiaaleista. Lämmittämättömissä asunnoissa sisälämpötila seuraa ulkolämpötilaa lyhyellä viiveellä. Sisäilman lämpötilamuutokset ovat hitaampia kuin ulkoilmassa, jolloin sisälämpötilan vaihteluväli on vuorokausitasolla pienempi. Sisäilman vesihöyrypitoisuus seuraa ulkoilman vesihöyrypitoisuutta vastaavalla tavalla.

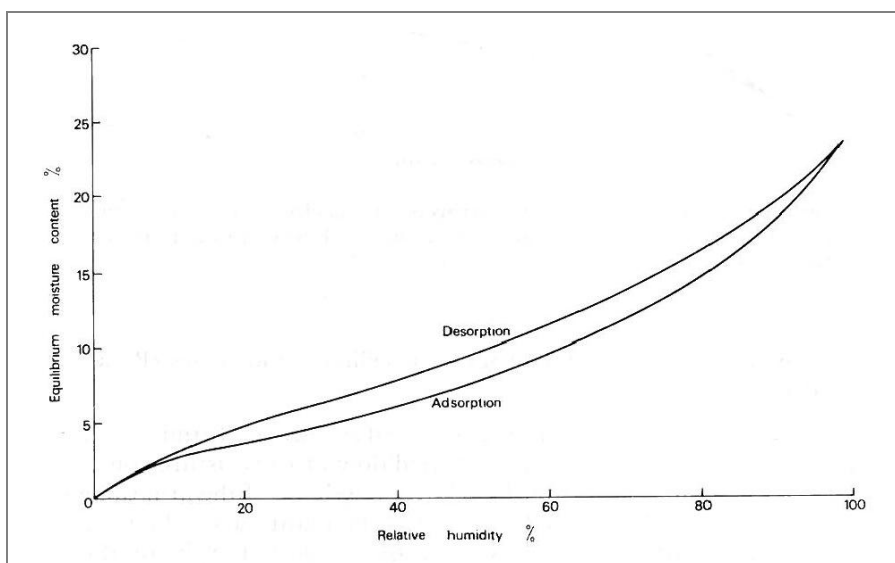
Sisälämpötilan muutokset ovat sitä pienempiä, mitä paremmin rakennusvaippa eristää lämpöä. Myös ilmanvaihtuvuus, joka muodostuu tarkoituksellisesti järjestetystä ilmanvaihdosta ja vuotoilmanvaihdosta, vaikuttaa oleellisesti sisätilan lämpö- ja kosteusolosuhteissa tapahtuviin muutoksiin. Mitä suurempi on ilmanvaihtuvuus rakennuksen sisä- ja ulkopuolen välillä, sitä

suuremmat ovat sisälämpötilassa ja sisäilman vesihöyrypitoisuudessa tapahtuvat muutokset. Kuivanapitolämmitettyissä asunnoissa sisälämpötila seuraa ulkolämpötilaa kuten lämmittämättömissä asunnoissa, mutta sisälämpötila on kuitenkin lämmityksellä aikaansaadun lämpötilaeron verran suurempi kuin mitä se olisi ilman lämmitystä.

Sisäilmaan yhteydessä olevat materiaalit vaikuttavat osaltaan sisätilojen lämpötila- ja kosteusolosuhteisiin, sillä ne sitovat itseensä lämpöä ja kosteutta ja hidastavat siten asunnon sisäolosuhteissa tapahtuvia muutoksia. Materiaalit tasaavat sisälämpötilan muutoksia siten, että lämpötilan kohotessa materiaalit sitovat lämpöä ja lämpötilan laskiessa ne luovuttavat sitomaansa lämpöä. Materiaalit käyttäytyvät samoin myös kosteuden osalta. Suhteellisen kosteuden kasvaessa materiaalit sitovat sisäilman kosteutta ja suhteellisen kosteuden laskiessa materiaalit luovuttavat kosteutta sisäilmaan. Materiaalin lämmönsitomiskyky riippuu mm. materiaalin ominaislämpökapasiteetista ja muista termisistä ominaisuuksista. Materiaalin kosteudensitomiskyky riippuu mm. materiaalin fyysisestä ja kemiallisesta rakenteesta sekä vallitsevista olosuhteista.

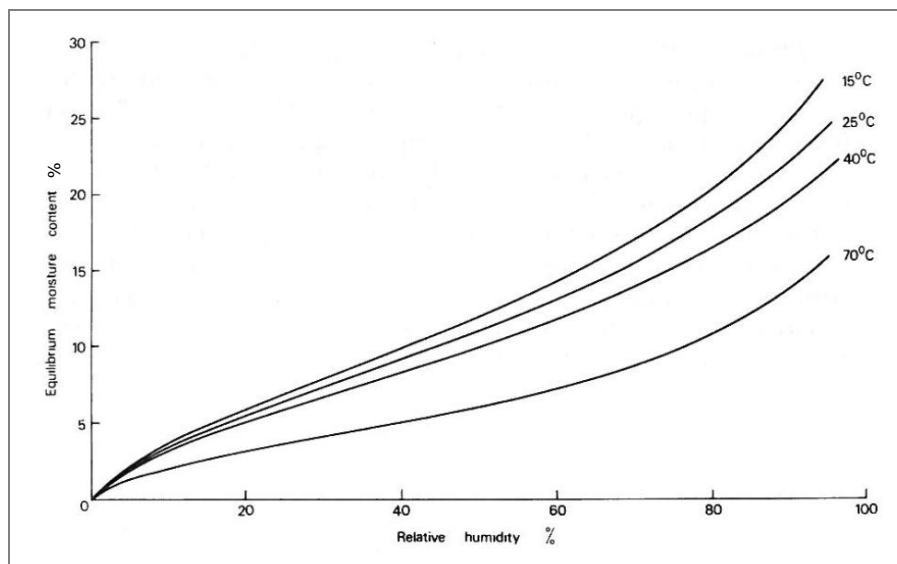
Vallitsevat olosuhteet määräävät kosteutta sitovan eli ns. hygroskooppisen materiaalin tasapainokosteustilan, jota kohti materiaali pyrkii joko sitomalla tai luovuttamalla kosteutta. Materiaalit voivat siten osaltaan vaikuttaa sisäilman vesihöyrypitoisuuteen. Vapaa-ajan asunnoilla esiintyviä hygroskooppisia materiaaleja ovat mm. puu, puu- ja kipsipohjaiset rakennustuotteet, tekstiilit, muurauskivet ja -laastit sekä betoni. Kullakin materiaalilla on erilainen kyky sitoa kosteutta, mutta tässä yhteydessä on käsitelty kuitenkin ainoastaan puuta ja sen hygroskooppisuutta, sillä puu ja puupohjaiset materiaalit ovat yleisesti käytettyjä ja erittäin hygroskooppisia.

Yleensä materiaalit pystyvät sitomaan sitä enemmän kosteutta, mitä korkeampi on suhteellinen kosteus. Lisäksi kosteudensitomiskyky riippuu siitä, onko materiaali kostumassa (absorptio) vai kuivumassa (desorptio). Kuivuva materiaali pystyy sitomaan enemmän kosteutta kuin vastaavissa olosuhteissa oleva kostuva materiaali. Absorption ja desorption välistä eroa kutsutaan hystereesi-ilmiöksi ja siihen vaikuttaa merkittävästi mm. materiaalin huokosverkosta. Kuvassa 2.3 on esitetty puun absorptio- ja desorptiokäyrät.



Kuva 2.3 Puun absorptio- ja desorptiokäyrä suhteellisen kosteuden funktiona 40 °C:n lämpötilassa (Princes Risborough Laboratory 1969). Pystyakselin tasapainokosteus kuvaa kosteuden määrää painoprosenteina.

Suhteellisen kosteuden ja kuivumis- tai kostumistilan ohella tasapainokosteuteen vaikuttaa osaltaan myös lämpötila. Lämpötila vaikuttaa materiaalin tasapainokosteuteen siten, että plussan puolella tasapainokosteuspitoisuus kasvaa lämpötilan laskiessa, mutta pakkasen puolelle mentäessä tasapainokosteus alkaa todennäköisesti pienentyä pakkasen kiristyessä. Tasapainokosteus on siis suurimmillaan, kun lämpötila on nollan asteen tuntumassa. Kuvassa 2.4 on esitetty puun tasapainokosteus neljässä lämpötilassa.



Kuva 2.4 Puun desorptiokäyrä neljässä lämpötilassa (Princes Risborough Laboratory 1969). Pystyakselin tasapainokosteus kuvaa kosteuden määrää painoprosenteissa.

Kuvista 2.3 ja 2.4 havaitaan, että tasapainotilassa oleva puu voi sisältää kosteutta lähes neljäsosan painostaan. Olettaen puun tiheyden olevan esim. 500 kg/m^3 kosteutta voi olla tavallisesti useita kymmeniä kilogrammoja yhtä kuutiometriä kohden. On kuitenkin huomattava, että esim. hirsiseinien kohdalla ainoastaan ohut pintakerros reagoi aktiivisemmin ja hirsiseinän keskikohdassa kosteuspitoisuusmuutokset ovat hyvin pieniä. Vaikka vain ohut pintakerros (muutama millimetri) voi vaikuttaa sisäilman vesihöyrypitoisuuteen, sillä voi silti olla suuri merkitys ottaen huomioon, että ilman vesihöyrypitoisuus voi olla enimmillään vain muutamia kymmeniä grammoja yhtä ilmakeuutiometriä kohden. Hirsipinnat voivat siis puskuroida tehokkaasti sisäilman vesihöyrypitoisuudessa tapahtuvia muutoksia.

Olettaen, että mökin sisälämpötila on pääsääntöisesti plussan puolella, voidaan todeta sisäilman lämpenemisen ja sisäilman suhteellisen kosteuden laskemisen pienentävän materiaalien tasapainokosteutta. Tasapainokosteuden pienentyminen johtaa siihen, että materiaali alkaa kuivua haihduttaen ylimääräistä kosteuttaan sisäilmaan.

2.2.2 Tavoiteltavat sisäolosuhteet

Vapaa-ajan asunnon sisäolosuhteita voidaan arvioida lämpötilan ja suhteellisen kosteuden perusteella. Sisäilman suhteellinen kosteus, joka riippuu ilman vesihöyrypitoisuudesta ja lämpötilasta, vaikuttaa lämpötilan ohella hyvin oleellisesti rakenne- ja irtaimistomateriaalien ominaisuuksiin, säilymiseen ja käyttäytymiseen sekä sisäilman laatuun. Liian alhainen suhteellinen kosteus lisää mm. pölyämistä sekä limakalvojen ja ihon oireilua ja liian korkea suhteellinen kosteus lisää puolestaan hygieniariskejä, pölypunkkien määrää, haitallisten hiukkasten

irtoamista materiaaleista, värivikojen ja muodonmuutoksien esiintymistä materiaaleissa, metallien korroosion nopeutumista sekä home- ja lahosienien esiintymistä.

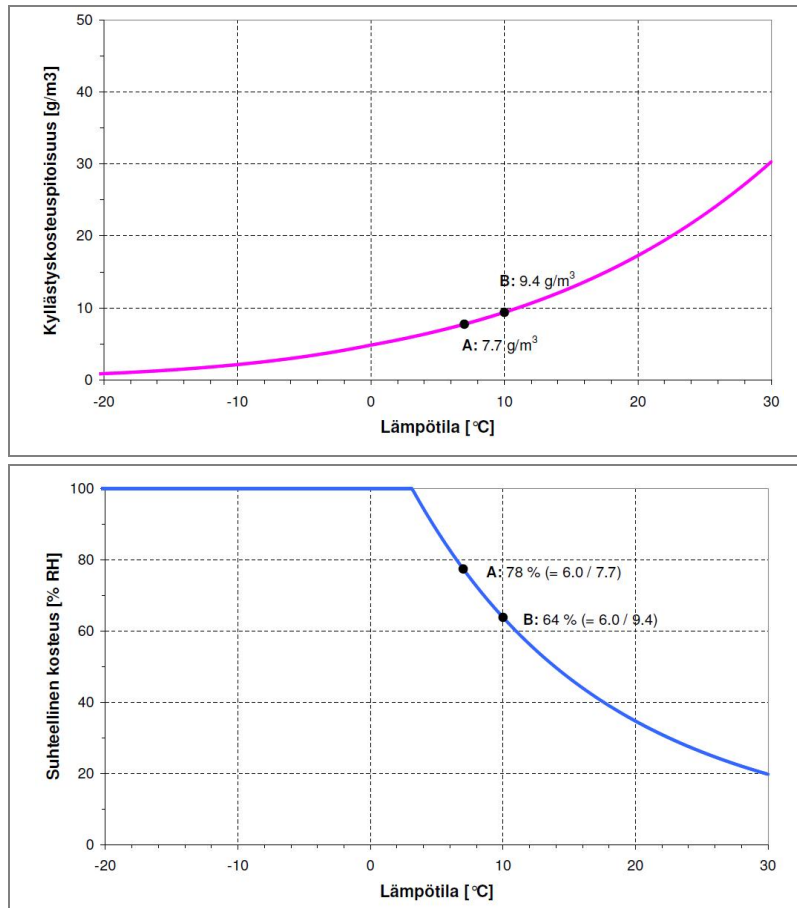
Suhteellinen kosteus vaikuttaa myös rakenteiden toimintaan siten, että esim. lämmöneristemateriaalien kohdalla suhteellisen kosteuden kohoaminen lisää materiaalin lämmönjohtavuutta, jolloin koko rakenteen lämmöneristyskyky heikkenee jonkin verran. Kuivanapitolämmityksellä pyritään kuitenkin vaikuttamaan ensisijaisesti sisäilman suhteelliseen kosteuteen, koska se on mökin rakenteiden ja irtaimiston kannalta merkittävin olosuhdetekijä.

Vapaa-ajan asuntojen osalta puupohjaisten materiaalien homehtuminen on merkittävin turmelutumisilmiö. Mikäli puupohjaisissa materiaaleissa ei esiinny homea, sisäpinnat ja irtaimisto eivät yleensä turmellu muillakaan tavoin (Vinha 2007). Poikkeuksen tekevät ainoastaan korrosioherkät metallit, jotka voivat alkaa ruostua jo 60 % RH:ssa. Yleisesti voidaan todeta, että homeenkasvua ei esiinny alle 0 °C:n lämpötiloissa tai jos suhteellinen kosteus on alle 80 % RH (Hukka & Viitanen 1999, Vinha et al. 2010). Vapaa-ajan asunnoissa tavoiteltava taso voisi siten olla, että kun asunto ei ole käytössä sisäilman suhteellinen kosteus olisi keskimäärin enintään 70 % RH ja pysyisi hetkittäisiä poikkeuksia lukuun ottamatta alle 80 % RH:n. Tällöin olosuhteet eivät olisi liian kriittiset edes ikkunapinnoilla, joilla suhteelliset kosteudet voivat olla ajoittain jopa 10...15 % RH korkeammat kuin sisäilmassa johtuen sisäilmaan nähden nopeammasta lämpötilan laskemisesta ulkoilman kylmetessä.

Sisäilman suhteellisen kosteuden rajoittaminen maksimissaan 80 % RH:een ei kuitenkaan takaa, että sisätilojen kriittisimpiin kohtiin ei missään tilanteissa tiivistyisi kosteutta. Esimerkiksi talviaikaisten vierailujen yhteydessä sisäilmaan tulee lisäkosteutta vedenkäytöstä (ruuanlaitto, tiskaus, peseytyminen ym.) sekä puurakenteista niiden luovuttaessa kosteutta lämmitessään, jolloin sisäilman vesihöyrypitoisuus kasvaa. Tilannetta kuvataan usein siten, että lämmittämisen yhteydessä mökki alkaa ns. hikoilla. Vaikka vesihöyrypitoisuus kasvaa, sisäilman suhteellinen kosteus laskee sen vuoksi, että lämmittäminen nostaa ilman kyllästyskosteuspitoisuutta. Ikkunapinnat lämpenevät kuitenkin sisäilmaan nähden hitaammin, jolloin niiden läheisyydessä ilman kyllästyskosteuspitoisuus pysyy alhaisempana. Ikkunapintojen läheisyydessä ilmaan ei siis mahdu yhtä paljon vesihöyryä, jolloin ylimääräinen kosteus tiivistyy vedeksi lasin sisäpintaan. Kosteutta voi tiivistyä samalla tavoin myös muihin vastaavanlaisiin sisäilmaa kylmempiin pintoihin.

2.2.3 Kuivanapitolämmitys ja sen toiminta

Kuivanapitolämmitys eroaa käytännössä perinteisestä peruslämmöstä lämmitykseen käytettävän tehon osalta. Peruslämpö, jolla vapaa-ajan asunnon sisätilassa pidetään tiettyä vakiolämpötilaa, usein 5–7 astetta, kuluttaa energiaa sitä enemmän, mitä kylmempää on ulkona. Kovilla pakkasilalla energiankulutus voi nousta hyvin suureksi. Kuivanapitolämmityksellä rakennuksen sisälämpötila pidetään puolestaan muutaman asteen ulkolämpötilaa korkeammalla esim. pienen vakioteholämmityksen avulla. Yksinkertaisessa muodossaan kuivanapitolämmitys sallii myös asunnon sisälämpötilan laskea pakkasen puolelle, jos ulkolämpötila on tarpeeksi matala. Vähäisellä lämmityksellä voidaan vaikuttaa merkittävästi asunnon kosteusolosuhteisiin ja pitää ne turvallisella tasolla. Kuvassa 2.5 on havainnollistettu, miten lämpötilan kohottaminen muuttamalla asteella voi vaikuttaa suhteelliseen kosteuteen.



Kuva 2.5 Lämmityksen vaikutus ilman suhteellisen kosteuteen. Kuvassa on esitetty, kuinka lämpötilan kohoaminen +7 °C:stä (piste A) +10 °C:een (piste B) vaikuttaa vesihöyryn kyllästyskosteuspitoisuuteen ja sitä kautta ilman suhteellisen kosteuteen tilanteessa, kun ilmassa on vesihöyryä 6,0 g/m³.

Lämmittäminen ei vaikuta ilman vesihöyrypitoisuuteen, mutta kasvattaa vesihöyryn kyllästyskosteuspitoisuutta ja pienentää siten ilman suhteellista kosteutta (vesihöyrypitoisuuden ja kyllästyskosteuspitoisuuden välistä suhdetta). Kuvan 2.5 pisteessä A esitetyt sisäolosuhteet voisivat hyvinkin esiintyä syys- tai kevätaikaan lämmittämättömän vapaa-ajan asunnon sisätilassa. Kuvasta nähdään, että lämpötilan kohottaminen 3 asteella (pisteeseen B) laskee suhteellista kosteutta noin 14 % RH. Vaikkakaan vaikutus ei ole kaikissa tilanteissa yhtä merkittävä, vapaa-ajan asuntojen sisäolosuhteet ovat kuitenkin usein sellaiset, että pieni lämpötilan kohottaminen voi laskea suhteellisen kosteuden tasolle, joka on asunnon ja irtaimiston säilyvyyden kannalta huomattavasti parempi. Kuivanapitolämmitys perustuu tähän ilmiöön.

Asunnon lämmityksellä on välillisiä vaikutuksia myös sisäilman vesihöyrypitoisuuteen. Sisäilman vesihöyrypitoisuuteen voivat vaikuttaa mm. ilmanvaihdon tehostuminen sisä- ja ulkoilman välisen lämpötilaeron kasvaessa ja sisätilaan yhteydessä olevien materiaalien kosteudensitomiskyvyssä tapahtuvat muutokset. Asunnon käytön aikana kosteuspitoisuuteen vaikuttaa em. ilmiöiden lisäksi myös asumisen kosteustuotto.

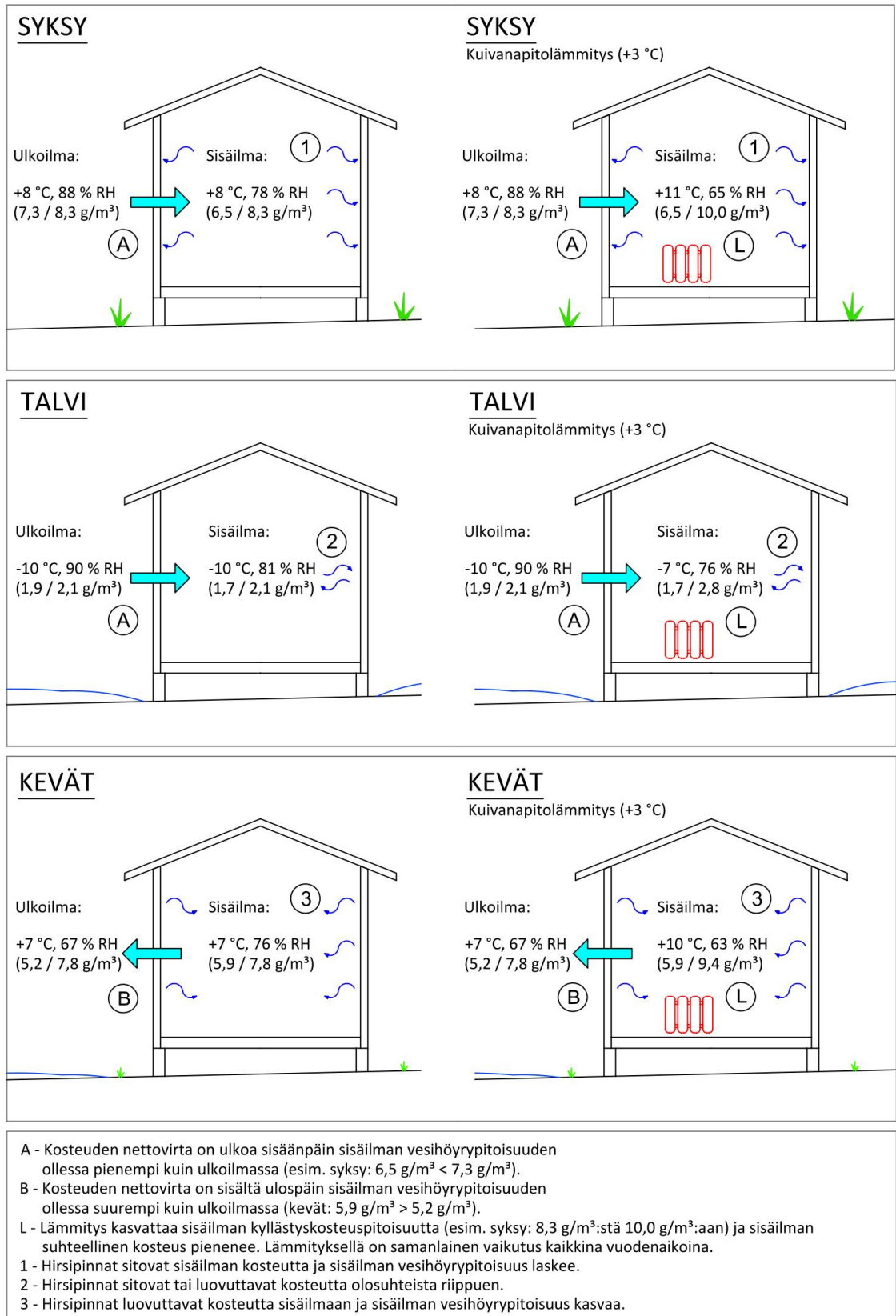
Kuivanapitolämmitys soveltuu parhaiten mökeillä, joita käytetään pääosin kesällä ja satunnaisesti talvella. Kuivanapitolämmitys edellyttää, että mökki on kytketty sähköverkkoon. Kuivanapitolämmitys ei sovellu kovin hyvin mökeille, jotka on tehty ympärivuotiseen käyttöön

(esim. kakkosasunnoiksi). Näiden asuntojen varustelutaso on usein lähellä omakotitalotasoa (vesivessa, kodinkoneet, tekniset järjestelmät yms.) ja niitä käytetään runsaasti, jolloin niitä pidetään usein ns. valmiuslämmityksellä, jotta lämpötilan nosto asuinlämpötilaan olisi nopeampaa. Tällaisten asuntojen rakentamisessa tulee lisäksi ottaa huomioon nykyiset lämmöneristystä ja jäteveden käsittelyä koskevat määräykset ja vaatimukset.

Kuivanapitolämmitys on mahdollista toteuttaa eri tavoin. Yksinkertaisin ratkaisu, joka oli käytössä myös tutkimuksen koekohteissa, on asentaa sopivantehoinen sähköpatteri keskeiselle paikalle mökkiä. Joissain tapauksissa lämmitys voidaan järjestää jo olemassa olevilla pattereilla. Älykkäämmät järjestelmät voivat olla esim. termostaattiohjattuja siten, että sisätilaa lämmitetään vain tarpeen vaatiessa mitattujen sisä- ja ulkolämpötilan perusteella. Sisätilan lämmittäminen sisäilman suhteellisen kosteuden perusteella saattaa olla lämpötilaohjausta parempi vaihtoehto, mutta järjestelmä vaatii jossain määrin kehittyneempää tekniikkaa, jota on ainakin tällä hetkellä rajoitetummin saatavilla. Lämmitysjärjestelmä voi lisäksi olla ohjattu sekä lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mukaan, jolloin lämmitystä voidaan vähentää erityisesti talviaikaan, jolloin homeen kasvu ei ole mahdollista pakkasen tai muuten alhaisten lämpötilojen johdosta. (Rytönen & Kirkkari 2010)

Asuntoa voidaan lämmittää myös siten, että ainoastaan pesutilaa lämmitetään lämmityspatterilla ja pesutilan lämpöhäviöt lämmittävät asunnon muita tiloja. Tässä tapauksessa vesijärjestelmien jäätymisriski pienentyy ja pesutilaan voidaan tarvittaessa varastoida myös muita vaurioherkkiä kodinkoneita. Tällainen ratkaisu ei välttämättä sovellu kaikkiin mökkeihin ja sen toteuttamisedellytykset tulisi ottaa huomioon jo suunnittelussa.

Kuvassa 2.6 on esitetty pääperiaatteet siitä, miten kuivanapitolämmitys vaikuttaa vapaa-ajan asunnon sisäolosuhteisiin eri vuodenaikoina. Kuvassa on esitetty myös sisäilman vesihöyrypitoisuuteen vaikuttavia ilmiöitä sekä kosteuden kulkusuunnat eri tilanteissa. Eräs merkittävä sisäilman vesihöyrypitoisuuteen vaikuttava ilmiö on kosteuden siirtyminen sisäilmasta hirsiseiniin ja päinvastoin. Kosteuden kulkeutumista on kuvattu kosteuden nettovirtana, mikä tarkoittaa, että kosteutta siirtyy enemmän esitettyyn kuin vastakkaiseen suuntaan. Kosteuden nettovirta sisältää sekä ilmanvaihdon kautta (konvektion) että rakenteiden läpi kulkeutuvan osuuden (diffuusion). Nettovirta on siis näiden tekijöiden yhteisvaikutus.



Kuva 2.6 Kuivanapitolämmityksen toiminta vapaa-ajan asunnoissa eri vuodenaikoina. Kuvassa on esitetty tyypilliset sisä- ja ulkoilman olosuhteet. Suhteellisen kosteuden määräytyminen on esitetty suluissa lukuarvon jäljessä.

Kuvasta 2.6 havaitaan, että kuivanapitolämmityksellä on suurempi vaikutus sisäilman suhteelliseen kosteuteen syksyisin ja keväisin, jolloin lämmitys nostaa ilman kyllästyskosteuspitoisuutta enemmän. Syksyisin ja keväisin lämmittämättömän mökin sisäilmaolosuhteet ovat homeen kasvun kannalta lähellä kriittistä tasoa, mutta yleensä vielä hyväksyttävät. Talvella pakkanen puolestaan estää homeen kasvun, vaikka sisäilman suhteellinen kosteus olisikin korkea. Mikäli kuvassa 2.6 esitetyissä syysolosuhteissa olisi $+8\text{ °C}$:n peruslämpöön säädetty mökki, lämmitys ei olisi vielä päällä ja mökin sisäolosuhteet olisivat vastaavanlaiset kuin lämmittämättömässä mökissä. Myös keväällä tilanne voisi olla vastaava. Kuivanapitolämmityksen voidaan siis todeta olevan kevät- ja syysolosuhteissa peruslämpöä suotuisampi lämmitystapa.

Energiakulutuksen optimoimiseksi kuivanapitolämmitystä voidaan kehittää esim. siten, että lämmitys toimisi epäjatkovana ja olisi päällä vain tarpeen vaatiessa. Asunnon sisäilman ollessa riittävän kuiva (esim. suotuisten ulko-olosuhteiden seurauksena) lämmitys voitaisiin katkaista tilapäisesti. Toisaalta lämmitystä voitaisiin vähentää merkittävästi ajankohtina, jolloin pakkanen estää joka tapauksessa homeen kasvun. Tämä edellyttää toki, etteivät matalat lämpötilat tai korkeat suhteelliset kosteudet aiheuta vahinkoa millään muulla tavoin.

2.2.4 Kuivanapitolämmityksen lämmitystehoon vaikuttavat tekijät

Kuivanapitolämmityksen suotuisten sisäolosuhteiden ylläpitämiseen tarvittava lämmitysteho riippuu useista eri tekijöistä. Lämmitystehon suuruuteen vaikuttavat esim. sisä- ja ulkoilman välille tavoiteltava lämpötilaero; rakennusvaipan lämmöneristävyys, ilmanpitävyys ja ilma- vuotokohtien sijainti; ilmanvaihto; mökin tilavuuden ja pinta-alan suhde; rakennuksen sijainti ja ympäristö sekä ikkunoiden suuntaus. Tutkimuksen puitteissa kaikkien tekijöiden vaikutusta ei ollut tarkoitus selvittää erikseen ja toisaalta lämmitystehon määrittämisessä käytetty malli (ks. kohta 5.2) pyrittiin pitämään kohtalaisen yksinkertaisena.

Mallin kertoimien määrittämisessä käytettiin apuna kenttämittaustuloksia, joten eri lämmitystehoon vaikuttavat tekijät on ainakin osittain mukana. Näistä tekijöistä tarkasteltiin erikseen tosin ainoastaan vaipan ilmanpitävyyden, lämmöneristuksen, auringonsäteilyn ja tuulen vaikutusta sisäolosuhteisiin ja sitä kautta lämmitystehon suuruuteen (ks. luku 3).

Hyvin lämmöneristetyssä asunnossa tarvitaan pienempien johtumishäviöiden vuoksi vähemmän lämmitystä kuin huonosti lämmöneristetyssä asunnossa. Myös asunnon mittasuhteet vaikuttavat suoraan johtumis- ja vuotoilman lämpöhäviöiden suuruuteen. Asunnon tilavuuden ja pinta-alan suhde vaikuttaa vaadittavaan lämmitystehoon, sillä tilavuuden kasvaessa lämmitysenergian kulutus lisääntyy. Tavanomaista korkeammissa asunnoissa neliötä kohden tarvittava lämmitysteho on siis suurempi kuin matalammissa. Johtumishäviöiden suuruuteen vaikuttaa myös sisä- ja ulkoilman välinen lämpötilaero.

Kuivanapitolämmityksellä sisä- ja ulkoilman välillä ylläpidettävä lämpötilaero on käytännössä vapaa-ajan asunnon omistajan päätettävissä, sillä lämpötilaeron suuruus vaikuttaa suoraan mm. vapaa-ajan asunnon käyttömukavuuteen. Mitä suurempi on sisä- ja ulkoilman välinen lämpötilaero, sitä alhaisempi on sisäilman suhteellinen kosteus. Lämpötilaero vaikuttaa myös siihen, kuinka nopeasti asunnon sisätila lämpenee haluttuun asumislämpötilaan.

Ilmanvaihdon osalta voidaan todeta, että mitä pienempi on mökin ilmanvaihto, sitä pienempi on tarvittava lämmitysteho (ks. kohta 3.3.2). Ilmanvaihto muodostuu tarkoituksellisesti järjestetystä ilmanvaihdosta sekä vuotoilmanvaihdosta, joka on ns. hallitsematonta ilmanvaihtoa. Vuotoilmanvaihdon suuruuteen vaikuttavat rakennusvaipan ilmanpitävyys, ilmavuotokohtien sijainti sekä sisä- ja ulkopuolen välinen paine-ero. Paine-eroon vaikuttavat puolestaan ilmanvaihto, tuuli, tulisijojen käyttö sekä lämpötilaerot. Vuotoilmanvaihdon merkitys korostuu aikoina, jolloin varsinainen ilmanvaihto (eli ilmanvaihtoreitit) on suljettuna, koska tällöin ilmanvaihto muodostuu kokonaan vuotoilmanvaihdosta. Ilmanpitävyydeltään paremmassa mökissä vuotoilmanvaihdon lämpöhäviöt ovat pienemmät. Sen vuoksi, että lämpötilaeroista vaipan yli syntyvä paine-ero muuttuu rakennuksen korkeussuunnassa, ilmavuotokohtien sijainti vaikuttaa vuotoilmanvaihdon suuruuteen ja sitä kautta lämpöhäviöihin. Kuivanapitolämmitetyssä rakennuksessa lämpötilaerot ovat pienemmät ja niiden vaikutus on vähäisempi kuin tavanomaisesti lämmitetyissä rakennuksissa.

Rakennuksen ilmanpitävyydellä on energiakulutuksen lisäksi vaikutusta myös rakennuksen sisäilman laatuun, vaipparakenteiden kosteustekniseen toimivuuteen sekä asumismukavuuteen (mm. vetoisuuden ja pintalämpötilojen kautta). Paine-erojen aiheuttama konvektio siirtää mukanaan sekä lämpöenergiaa että kosteutta. Vuotoilman mukana rakennuksen sisäilmasta ulospäin siirtyvä kosteus voi esim. kondensoitua rakenteen ulko-osiin sisäilmaan nähden alhaisemman lämpötilan vuoksi. Toisaalta ulkoa sisäänpäin suuntautuva konvektio voi viilentää paikallisesti sisäpintojen lämpötiloja, jolloin sisäilman kosteus saattaa kondensoitua näihin kohtiin. Konvektion mukana voi siirtyä myös ilmaan sitoutuneita epäpuhtauksia, millä on merkitystä erityisesti silloin, kun konvektio suuntautuu rakennuksen ulkopuolelta sisäänpäin. (Aho & Korpi 2009, Vinha et al. 2005a)

Mitä tuulisemmalla ja suojaamattomammalla paikalla rakennus sijaitsee, sitä enemmän ilmaa vaihtuu painovoimaisen ilmanvaihdon ja vuotoilmanvaihdon kautta. Toisin sanoen, vaikka kahden samanlaisen mökin ilmanpitävyys ja ilmanvaihto olisivat identtisiä, ilmavirtausten mukana siitä mökistä, joka sijaitsee tuulisemmalla ja avoimemmalla paikalla, karkaa enemmän lämpöä.

Rakennuksen sijainnista, erityisesti sen ympäristön avoimuudesta ja ikkunoiden suuntauksesta, riippuu myös se, kuinka paljon auringonsäteily vaikuttaa asunnon lämpötilaolosuhteisiin. Jos vapaa-ajan asunto sijaitsee pohjoisessa, talvella aurinko ei paista päivälläkään, eikä asunto kykene siten varastoimaan auringon lämpöä sen paremmin ulkovaippaan kuin ikkunoiden kautta asunnon sisälle. Tästä johtuen pohjoisessa sijaitsevan asunnon lämmitysenergiankulutus on suurempi kuin etelässä. Julkisivujen suuntauksella on myös merkitystä, sillä etelään suunnattujen ikkunoiden kautta asuntoon voi tulla ja varastoitua huomattavasti enemmän auringon energiaa kuin pohjoiseen suunnattujen ikkunoiden kautta. Lisäksi ympäristön ja ulkonevien rakenteiden aiheuttamat varjostukset vaikuttavat osaltaan asuntoon kohdistuvan auringonsäteilyn määrään.

2.2.5 Vapaa-ajan asuntojen vaipparakenteiden toiminta

Vapaa-ajan asunnoissa käytetään vastaavanlaisia rakenteita kuin jatkuvassa käytössä olevissa asuinrakennuksissa, sillä vapaa-ajan asunnoille ei ole olemassa omia määräyksiä ja ohjeita. Jotta kuivanapitolämmityksen riskittömyydestä voitaisiin olla varmoja, tutkimuksessa tarkasteltiin myös vaipparakenteiden toimintaa lämmittämättömissä ja kuivanapitolämmitetyissä vapaa-ajan asunnoissa ja selvitettiin vaipparakenteiden vaatimaa asunnon lämmitystarvetta. Vaipparaken-

teiden toiminnan selvittämistä puolsi myös tutkimuksen edetessä vahvistunut esioletus, jonka mukaan vapaa-ajan asuntojen sisäilmassa on pääsääntöisesti kosteusvajetta (ks. kohta 3.3.3). Sisätilojen kosteusvaje merkitsee, että kosteutta kulkeutuu vaipparakenteiden läpi ulkoa sisään-päin, mikä on jatkuvassa käytössä oleviin asuinrakennuksiin nähden päinvastainen suunta.

Vapaa-ajan asunnoilla käytetyistä rakenteista ryömintätilaiset alapohjarakenteet ovat olosuh-teidensa osalta kriittisimmät, koska maa viilentää ryömintätilaa ja tuottaa sinne kosteutta. Ryö-mintätilan lämpö- ja kosteusolosuhteet voivat olla ulkoilmaan nähden huomattavasti haitallisemmat, mikäli ryömintätila ei pääse tuuletumaan kunnolla. Yleensä maakosteus pitää ryömintätilan suhteellisen kosteuden korkeana. Lisäksi maasta ja alapohjan läpi sisältä siirtyvä lämpö pitää ryömintätilan lämpötilan ulkoilman lämpötilaa korkeammalla. Olosuhteet ovat siis sekä kondensoitumisen että homeen kasvun kannalta hyvin kriittisiä.

Maan vaikutusta voidaan vähentää esim. tehostamalla ryömintätilan tuuletusta tai lämpöeristä-mällä maapohja kauttaaltaan. Mikäli alapohja on ulkoilmaan avoin eli esim. pilariperusteinen, ryömintätilan olosuhteiden voidaan katsoa olevan hyvin lähellä ulkoilmaolosuhteita, ellei ryö-mintätila ole erityisen kostea esim. veden lammikoitumisen johdosta.

Oikeaoppisesti toteutettujen tuulettuvan yläpohjan ja alapuolelta lämmöneristetyin maanvaraisen laatan olosuhteet eivät ole yleensä yhtä kriittiset kuin ryömintätilaisen alapohjan kohdalla. Ylä-pohjan osalta toimivan tuuletusraon, johon rakenteen oletetaan yleensä ulkopinnaltaan rajoittu-van, olosuhteiden voidaan katsoa olevan lähempänä ulkoilmaolosuhteita, vaikka tuuletusraon olosuhteisiin vaikuttaakin vastasäteilyn aiheuttama vesikatteen yönaikainen alijäähtyminen ja sen mahdollisesti aiheuttama kosteuden kondensoituminen tuulettutilassa. (Vinha 2007)

Kenttätutkimuksissa koekohteina oli mukana ainoastaan vapaa-ajan asuntoja, joissa ulkoseinä-rakenne oli lisäeristämätön massiivihirsi. Lisäeristämätön massiivihirsi poikkeaa puurankara-kenteesta ja sisäpuolelta lisälämmöneristetyistä hirrestä mm. kosteustekniseltä toiminnaltaan sekä lämmön- ja kosteuden sitomiskyvyltään. Vähemmän käytettyihin ulkopuolelta lisäeristet-tyihin hirsirakenteisiin nähden lisäeristämättömät massiivihirsirakenteet kykenevät sitomaan itseensä myös auringon säteilyenergiaa, millä voi olla merkittävä vaikutus asunnon sisäolosuh-teisiin ja sitä kautta myös asunnon energiankulutukseen (Vinha et al. 2008). Yleisesti ottaen lisäeristämätön massiivihirsiseinä on kosteusteknisesti turvallinen rakenne, koska siinä ei ole toisistaan lämmön- tai vesihöyrynläpäisevyydeltään poikkeavia kerroksia, jolloin rakenne toimii moitteettomasti riippumatta kosteuden kulkusuunnasta.

Vaipparakenteiden toimintaan vaikuttavat myös osaltaan rakenteen toteuttamistapa ja rakentees-sa olevat mahdolliset puutteet tai rakennusvirheet. Useiden aikaisempina vuosikymmeninä to-teutettujen rakenteiden on havaittu olevan nykytiedon valossa kosteusteknisesti virheellisiä, eivätkä ne siten täytä nykyisiä rakentamismääräyksiä. Näiden rakenteiden joukossa on myös sellaisia, jotka eivät ole kosteusteknisesti toimivia riippumatta siitä, kuinka paljon asuntoa läm-mitetään. Eräs tällainen rakenne on alapuolelta eristämättömän betonilaatan päälle asennettu puulattia. Rakennusteknisistä virheistä myös esim. rakenteen ilmapuotokohdat tai kylmäsillat voivat aiheuttaa sen, että rakenteessa voi esiintyä paikallisia kosteus- tai homevaurioita, vaikka rakenne toimisikin muuten moitteettomasti jopa ilman lämmitystä. Myös nämä asiat on huomatta-va lämmitystehon määrittämisessä, kun otetaan huomioon, että useat mökkirakentajien joukko on ammattitaidoltaan ja -tietämykseltään erittäin moninainen.

3 KENTTÄMITTAUKSET

3.1 Kenttämittausten suoritus

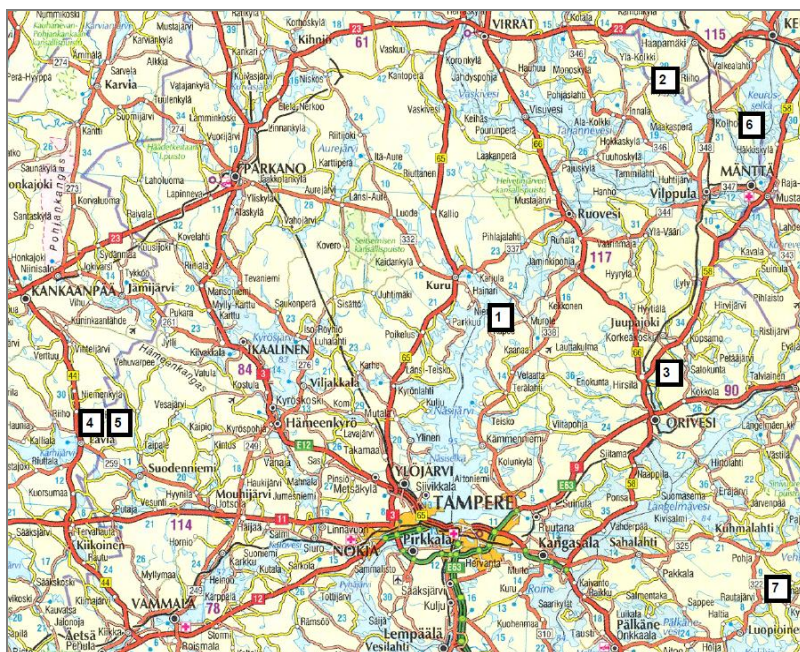
3.1.1 Kenttämittausten tavoitteet ja laajuus

Kenttämittausten tavoitteena oli hankkia tietoa lämmittämättömien ja lämmitettyjen vapaa-ajan asuntojen lämpötila- ja kosteusolosuhteista sekä niihin vaikuttavista ilmiöistä ja tekijöistä. Kenttämittaustulosten perusteella oli tarkoitus arvioida mm. asuntojen sisäolosuhteiden kriittisyyttä eri turmeltumisilmiöiden kannalta. Vapaa-ajan asuntojen olosuhteisiin liittyvää tutkimustietoa oli entuudestaan rajoitettusti saatavilla, minkä johdosta kenttämittaustuloksia käytettiin avuksi myös laskentatarkasteluluissa käytettyjen laskentaolosuhteiden mallintamisessa (luku 4) ja kuivanapitolämmityksen tehotarpeen määrittämisessä (luku 5).

Koekohteina oli seitsemän Tampereen läheisyydessä sijaitsevaa lisäeristämätöntä massiivihirsirakenteista vapaa-ajan asuntoa. Kenttämittaukset muodostuivat näiden koekohteiden ilmatiiviyskysymysten mittaamisesta ja koekohteissa suoritetuista lämpötila- ja kosteusmittauksista. Viidessä koekohteessa suoritettiin lämpötila- ja kosteusmittauksia kahden talven yli vuosina 2007–2009 ja kahdessa koekohteessa ainoastaan joko talvena 2007–2008 tai talvena 2008–2009. Kenttämittausten lisäksi kohteista kerättiin tietoja näiden omistajille laadituilla kyselyillä ja havainnoinnin avulla kohdekäyntien yhteydessä.

3.1.2 Koekohteet

Kaikki seitsemän koekohdetta olivat lisäeristämättömiä massiivihirsirakenteisia vapaa-ajan asuntoja. Ensimmäisen talven jälkeen yksi koekohde (koekohde 1) jäi pois ja sen tilalle valittiin uusi (koekohde 7). Koekohteiden sijainti on esitetty kuvassa 3.1. Koekohteet 4 ja 5 oli rakennettu samalle tontille muutaman kymmenen metrin etäisyydelle toisistaan.



Kuva 3.1 Koekohteet kartalla.

Koekohteiden perustiedot on esitetty taulukossa 3.1. Kaikissa koekohteissa oli painovoimainen ilmanvaihto ja peruskorjausta oli tehty ainoastaan koekohteessa 4. Peruskorjaus tehtiin mökin siirron yhteydessä ja siinä uusittiin mm. ala- ja yläpohjarakenteita.

Taulukko 3.1 Koekohteiden perustiedot

Koekohde nro	1	2	3	4	5	6	7
Mittauksissa mukana	07 – 08	07 – 09	07 – 09	07 – 09	07 – 09	07 – 09	08 – 09
Sijainti	Tampere	Keuruu	Orivesi	Lavia	Lavia	Keuruu	Pälkäne
Rakennusvuosi	1989	2000	2007	1985 *	2002	1993	1988
Sisätilan kokonaispinta-ala [m ²]	53	24	75	17	66	27	28
Sisätilan kokonaistilavuus [m ³]	135	68	182	40	181	78	69
Vaipan painotettu U-arvo [W/(m ² ·K)]	ei laskettu	0,66	0,45	0,60	0,51	0,60	0,63
Ilmavuotoluku, n ₅₀ [1/h]	24,0	26,9	15,7	30,0	5,1	29,7	6,3
Ilmanvaihtoreitit	avoinna	osittain avoinna	osittain avoinna	osittain avoinna	osittain avoinna	suljettu	suljettu
Lämmitys talvella 07–08	ei	ei	ei	ei	peruslämpö	vakio 220 W	ei ollut mukana
Lämmitys talvella 08–09	ei ollut mukana	vakio 210 W	vakio 780 W **	vakio 110 W **	vakio 800 W	vakio 220 W	vakio 140 W
Ikkunoiden pääsuuntaus	länsi	itä	länsi	itä	itä	itä	itä

Huom. * Peruskorjaus vuonna 2000

** Koekohde oli osan mittausajasta lämmittämättömänä.

Taulukossa 3.1 esitetyt pinta-alat ja tilavuudet on laskettu rakennuksen kokonaissisämittojen mukaan ja arvoissa on mukana myös ne tilat, joihin oli erillinen sisäänkäynti ja joista ei ollut suoraa kulkuyhteyttä varsinaiseen asuinsisätilaan. Tällaisia tiloja, joiden olosuhteita ei seurattu lämpötila- ja kosteusmittauksissa, olivat erillisellä sisäänkäynnillä varustetut pukeutumis- ja saunatilat koekohteissa 1, 4 ja 6.

Ensimmäisen talven 2007–2008 aikana koekohteet 1-4 olivat lämmittämättömänä, koekohde 5 oli n. 9 °C:n peruslämmössä ja koekohteessa 6 oli jatkuva vakioteholämmitys. Koekohteen 6 lämmitys oli toteutettu yhdellä lämmityspatterilla ja lämmitystapa vastasi kuivanapitolämmityksen yksinkertaista mallia. Toisena talvena 2008–2009 kaikissa mukana olleissa kuudessa koekohteessa kokeiltiin vastaavanlaista vakiotehoista kuivanapitolämmitystä. Lukuun ottamatta koekohteita 3 ja 4 lämmitys oli päällä koko mittausjakson. Koekohde 3 oli lämmitettynä tammikuun loppuun (31.1.) saakka ja koekohde 4 oli lämmitettynä tammikuun 6. päivään saakka.

Vaipparakenteiden U-arvon laskemiseksi koekohteiden vaipparakenteet (tyypit, eristepaksuudet, ikkunalasit yms.) selvitettiin haastattelujen ja havainnoinnin avulla. U-arvojen määrittämisessä käytettiin Rakentamismääräyskokoelman osan C4 (2003) mukaista laskentamenetelmää laske-malla rakenteelle vain kokonaislämmönvastuksen alalikiarvo. Ikkunoiden ja ovien U-arvot arvi- oitiin pelkästään niiden iän ja tyyppin perusteella. Ylä- ja alapohjan lämmöneristeiden lämmönjohtavuusarvona (λ -arvona) käytettiin 0,040 W/(m²·K) riippumatta asunnon rakennus- vuodesta tai siitä, oliko eristemateriaali puukuitueristettä vai mineraalivillaa. Tutkittujen koe- kohteiden ylä- tai alapohjassa ei ollut käytetty solumuovieristeitä. Lopuksi vaipan yli määritettiin pinta-aloilla painotettu U-arvo.

Painotettuja U-arvoja käytettiin kuivanapitolämmityksen lämmitystehon määrittämisessä käytettävän mallin oletustehon määrittämiseen (kohta 5.1). Muista koekohteista U-arvoltaan eniten poikkeava koekohte 3 oli mittausten aikana runsaassa käytössä, mikä osaltaan hankaloitti koekohteiden painotetun U-arvon ja sisäolosuhteiden yhteyden selvittämistä.

Taulukosta 3.1 voidaan havaita, että koekohte 5 oli mittaustulosten perusteella tiivein (pienin n_{50} -luku). Tampereen teknillisen yliopiston vuosina 2005–2008 tekemissä ilmatiiviysmittauksissa 20 hirsitalon n_{50} -luvun keskiarvoksi saatiin 6,0 1/h (Vinha et al. 2009) eli näin ollen ainoastaan koekohteet 5 ja 7 olivat ympärivuotisessa asuinkäytössä oleviin hirsitaloihin nähden kohtalaisen tiiviitä. Vaipan ilmatiiviyden ohella myös asunnon ilmanvaihtoreittien pitäminen suljettuna tai avoinna mittausjaksojen aikana on osaltaan vaikuttanut asunnon sisäolosuhteisiin ja kuivanapitolämmityksen toimintaan.

3.1.3 Ilmatiiviyden mittaaminen

Mökkien ilmatiiviydet mitattiin painekoemenetelmällä ja painekoe suoritettiin Suomessa vahvistetun standardin SFS-EN 13829 (2000) mukaisesti. Koe tehtiin tietokone-ohjattuna käyttäen The Energy Conservatory:n valmistamaa Minneapolis Blower Door laitteistoa ja TECTITE ohjelmistoa.

Ennen painekokeen aloittamista rakennusvaippaan tarkoituksellisesti tehdyt aukot ja ilmanvaihtoreitit, kuten ikkunat, ovet ja venttiilit, suljettiin ja tiivistettiin. Tämän jälkeen asunnon sisätilaan luotiin vuoroin yli- ja alipaine oviaukkoon sijoitetun puhallinsysteemin avulla. Kokeen aikana puhallin mittasi sen läpi virtaavaa ilmamäärää. Koekohteiden ilmavuotoluvut saatiin vertailukelpoisiksi määrittämällä rakennuksen ilmatilavuuteen suhteutettu ilmavuotoluku (n_{50} -luku) kaavan 3.1 mukaisesti.

$$n_{50} = \frac{R_{50}}{V} \quad (3.1)$$

Missä n_{50} = rakennuksen ilmavuotoluku 50 Pa:n paine-erolla (1/h)
 R_{50} = painekokeella määritetty ilmavirtaus 50 Pa:n paine-erolla (m^3/h)
 V = rakennuksen ilmatilavuus (m^3)

3.1.4 Lämpötila- ja kosteusmittaukset

Koekohteiden lämpötila- ja kosteusolosuhteita mitattiin kahden talven yli vuosina 2007–2009. Mittaukset alkoivat vuoden 2007 lokakuussa ja päättyivät vuoden 2009 kesäkuussa. Lukuun ottamatta koekohteita 1, 3 ja 7 mittauksia suoritettiin myös kesällä 2008. Lämpötila- ja kosteusmittauksissa käytettiin tallentavia mittalaitteita eli ns. dataloggereita. Malli oli Comark Diligence EV (N2003) ja virtalähteenä oli paristo. Valmistajan ilmoittama mittausalue on kosteuden osalta 0–97 % RH edellyttäen, ettei kosteutta kondensoidu. Mittatarkkuus on lämpötilan osalta $\pm 0,5$ °C ja suhteellisen kosteuden osalta ± 3 % RH. Loggerit mittaavat suhteellista kosteutta jään yli arvona. Mittauksia varten loggerit ohjelmoitiin mittaamaan lämpötilan ja suhteellisen kosteuden tunnin välein. Loggerien riittämättömän muistikapasiteetin johdosta mittausdata kerättiin kahdessa vaiheessa: keväällä 2008 ja mittausten päättyessä keväällä 2009.



Kuva 3.3 Dataloggerin sijoittaminen ikkunapinnalle.

Dataloggerin rakenteesta johtuen sitä ei voitu asentaa siten, että mittausanturi olisi ollut kiinni tutkittavassa pinnassa. Mittausanturi on suojattu lieriömäisellä muoviulokkeella (ks. kuva 3.3), minkä vuoksi mittausanturi jäi n. 1,5 cm etäisyydelle tutkittavasta pinnasta. Tarkastelupintojen todelliset lämpötila- ja kosteusolosuhteet ovat sen vuoksi poikenneet hieman loggerin mittauksista arvoista.

Kylmän pinnan olosuhteiden oletettiin poikkeavan sisäilman olosuhteista hitaampien lämpötilamuutosten johdosta. Kylmän pinnan tiedettiin olevan kondensoitumisen kannalta kriittinen erityisesti sisäilman lämpenemisen yhteydessä, jolloin pinnan läheisyydessä lämpötila olisi muuhun sisäilmaan nähden matalampi ja suhteellinen kosteus korkeampi. Sisälämpötilan laskiessa tilanne olisi vastaavasti toisinpäin. Kylmän pinnan loggeria ei asennettu koekohteeseen 4, koska sopivaa pintaa ei ollut. Kylmiä pintoja koekohteissa 1, 2, 3, 5 ja 6, 7 olivat mikroaaltouunin peltipinta, tiilitakan reuna, vuolukivinen ikkunalausta, tiskipöydän metallipinta, tiilinen palomuurin ja tiilitakan reuna.

3.2 Ilmatieteen laitoksen data ja mittausvuosien kriittisyys

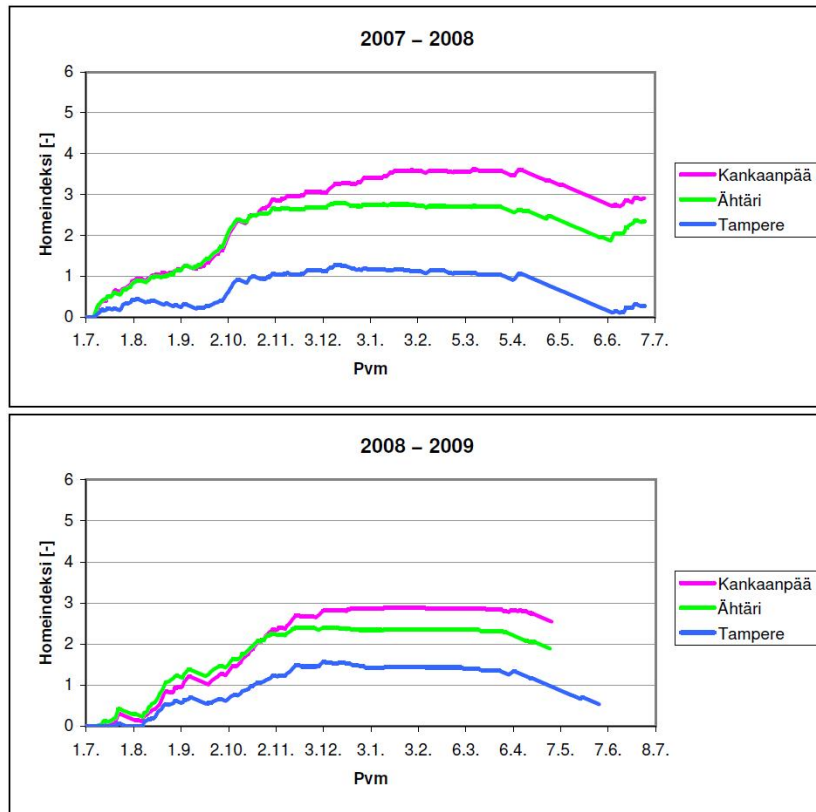
Kenttämittaustiedon lisäksi Ilmatieteen laitokselta hankittiin ilmastodataa. Tätä ilmastodataa käytettiin kenttämittaustietojen tarkastamiseen ja mittauksien tulosten analysointiin. Ilmatieteen laitoksen data sisälsi eri paikkakunnilla mitattua tietoa ulkoilman lämpötilasta, suhteellisesta kosteudesta, tuulen nopeudesta ja suunnasta sekä auringonsäteilytehosta. Tutkimuksessa käytetty data oli kerätty Tampereelta ja sen lähikunnista mahdollisimman läheltä koekohteiden sijaintia. Ilmastodataa kerättiin seuraavien paikkakuntien havainto-/ sääasemilta: Jokioinen (aseman tunnus: 1201), Jyväskylä (2401), Kankaanpää (2123), Tampere (1222) ja Ähtäri (3301). Auringonsäteilyä koskevaa dataa tilattiin Jokioisista ja Jyväskylästä ja lämpötilaa, suhteellista kosteutta ja tuulta koskevaa dataa muilta sääasemilta. Kankaanpään sääasemaa lähimpänä sijaitsivat koekohteet 4 ja 5, Ähtäriin sääaseman lähellä koekohteet 2 ja 6 ja Tampereen sääaseman lähellä koekohteet 1, 3 ja 7.

Ilmatieteen laitoksen lämpötila- ja kosteusmittaukset toteutetaan Vaisala Oy:n mittausantureilla, jotka mittaavat suhteellista kosteutta veden yli arvona. Mittaustapa poikkeaa kenttämittauksissa käytettyjen loggerien mittaustavasta, mikä aiheutti osaltaan varsinkin matalissa (alle 0 °C:n) lämpötiloissa korostunutta eroa Ilmatieteen laitoksen ja kenttämittaustulosten välillä. Eroa on aiheuttanut myös se, että ilmatieteen laitoksen mittauspisteet ovat voineet sijaita kenttämittausten dataloggereihin nähden mikroilmastollisesti erilaisessa ympäristössä, kuten esim. avoimemmalla paikalla. Lisäksi ulkoilman olosuhteissa olevien loggerien mittatarkkuuden tiedetään heikkenevän ajan kuluessa.

Mittausvuosien ulkoilmaolosuhteiden kriittisyyttä arvioitiin Vinhan (2007) esittämän puu-ulkoseinärakenteiden suunnittelumenetelmän ja siinä esitetyn referenssivuosien valinnan mukaisesti. Olosuhteiden kriittisyyden arviointi tehtiin käytännössä kahdessa vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa ulkoilmaolosuhteiden perusteella laskettiin eri vuosien homeindeksit. Toisessa vaiheessa olosuhteiden kriittisyyttä tarkasteltiin kosteuden kondensoitumisen osalta. Toisen vaiheen kondensoitumiskriittisyys kuvaa olosuhteiden kosteuskriittisyyttä vaipparakenteiden toiminnan kannalta, minkä vuoksi se tehtiin ensisijaisesti tutkimuksen laskentatarkasteluja varten. Lopuksi mittausvuosien kriittisyyttä muihin vuosiin nähden arvioitiin vertaamalla näissä kahdessa vaiheessa saatuja tuloksia Vinhan (2007) tutkimaan 30 vuoden ilmastodataan.

Vinha on selvittänyt vastaavalla tavalla vuosien 1971–2001 ulkoilmaolosuhteiden kriittisyyttä neljällä eri paikkakunnalla Jyväskylässä, Lahdessa, Sodankylässä ja Vantaalla. Jotta laskennan tulokset olivat vertailukelpoisia, laskenta suoritettiin (muista tutkimuksen hometarkasteluista poiketen) vanhemmalla homemallilla (Hukka & Viitanen 1999) ja laskennassa käytettiin samoja periaatteita eli laskenta aloitettiin heinäkuun alusta, laskentaväli oli 24 tuntia, puulajina käytettiin mäntyä ja pinnan laatuna alkuperäistä sahattua pintaa.

Tällä tavoin kolmella paikkakunnalla lasketut homeindeksit on esitetty kuvassa 3.4. Ulkoilmaolosuhteina käytettiin Ilmatieteen laitoksen mittaamia mittausjakson aikaisia olosuhteita.



Kuva 3.4 Ilmatieteen laitoksen ulkoilmaolosuhteiden perusteella lasketut homeindeksit.

Vinhan tutkimustuloksista voidaan havaita, että homeindeksi kohosi tarkasteltujen 30 vuoden aikana neljällä paikkakunnalla ainoastaan kaksi kertaa arvoa 3 suuremmaksi ja indeksin maksimiarvo oli ollut n. 3,1 (Lahti 85–86). Kuvasta 3.4 havaitaan, että talven 2007–2008 aikana Kankaanpään ulko-olosuhteilla laskettu homeindeksi kohosi todella korkealle ja sen maksimiarvo oli n. 3,6, joka on selvästi korkeampi kuin Vinhan tarkasteluissa. Vinhan tarkastelujen valossa myös Ähtäriin talven homeindeksin maksimia (n. 2,8) voidaan pitää korkeana. Kankaanpään ja Ähtäriin talven 2007–2008 voidaan siis todeta olleen homehtumisen kannalta hyvin kriittisiä.

Kuten kuvasta 3.4 havaitaan, homeindeksien kehittymistä ei laskettu kevään 2009 osalta säämittaustietojen puuttuessa. Tampereen osalta pidemmälle lasketun homeindeksin ja edellisvuoden kevätaikaisen kehittymisen perusteella voidaan kuitenkin todeta, että mittaustiedon puuttuminen ei ole vaikuttanut homeindeksien maksimiarvoihin. Kuvasta havaitaan myös, että kaikkien paikkakuntien osalta homeindeksien pienentyminen oli ehtinyt jo alkaa. Toisena talvena 2008–2009 homeindeksit olivat edellistalven nähden korkeammalla ainoastaan Tampereen kohdalla. Vaikka Kankaanpäässä ja Ähtäriin homeindeksit olivat edellistalven nähden pienempiä, indeksin maksimiarvoja voidaan kuitenkin pitää korkeina. Kankaanpäässä indeksin maksimi oli 2,9 eli olosuhteet olivat myös toisena talvena hyvin kriittiset.

Tarkastelujen perusteella mittaussajanjakson (2007–2009) aikaiset ulkoilmaolosuhteet olivat Kankaanpäässä ja Ähtäriin homehtumisen kannalta hyvin kriittiset. Tampereen osalta olosuhteiden kriittisyys ei puolestaan ollut poikkeava.

Kosteuden kondensoitumiskriittisyyden arviointi tehtiin laskemalla vuoden kriittisimmän, 30 päivän mittaisen, ajanjakson keskimääräinen kyllästysvaja. Kyllästysvaja, joka saadaan

kaavan 3.2 mukaisesti, kuvaa rakenteessa olevan kosteuden kuivumispotentialin suuruutta ulkoilmaan. Mitä pienempi on kyllästysvajausta, sitä suuremmalla todennäköisyydellä rakenteessa esiintyy kondenssia. (Vinha 2007)

$$\Delta v_{def} = \overline{v_{sat}} - v_e \quad (3.2)$$

Missä v_{def} = ulkoilman keskimääräinen kyllästysvajausta (kg/m^3)
 v_{sat} = ulkoilman vesihöyryn kyllästyskosteuspitoisuus nestemäisen veden yli määritettynä (kg/m^3)
 v_e = ulkoilman vesihöyrypitoisuus nestemäisen veden yli määritettynä (kg/m^3)

Kyllästysvajausta määritettiin ainoastaan Kankaanpään osalta, koska Kankaanpään vuotta 2007–2008 käytettiin sen homekriittisyyden johdosta tutkimuksen laskentatarkastelujen ulkoilmaolosuhteina eli ns. referenssivuotena.

Kankaanpään olosuhteilla laskettu kriittisin 30 päivän aikainen keskimääräinen kyllästysvajausta oli ensimmäisenä vuonna $0,117 \text{ g/m}^3$ ja toisena vuonna $0,124 \text{ g/m}^3$. Vinhan tarkasteluissa 30 vuoden aikana kosteusvajausta oli ollut neljällä paikkakunnalla ainoastaan kerran ensimmäisen vuoden arvoa ja kahdesti toisen vuoden arvoa pienempi. Kankaanpään olosuhteet olivat siis myös rakenteisiin kondensoituvan kosteuden ja sitä kautta rakenteiden toiminnan kannalta hyvin kriittisiä, mikä osaltaan tuki Kankaanpään vuoden 2007–2008 valitsemista laskentatarkastelujen referenssivuodeksi.

3.3 Kenttämittaustulokset

3.3.1 Koekohteiden sisäiset erot eri tarkastelupisteiden välillä

Lämpötila- ja kosteusmittaustulokset on esitetty liitteessä 1, jossa eri tarkastelupisteiden mittaustulokset on esitetty koekohteittain 24 tunnin vuorokausikeskiarvoina. Koekohteiden sisäisiä lämpötila- ja kosteuseroja tarkasteltiin vertaamalla eri puolilla koekohdetta olleiden tarkastelupisteiden olosuhteita keskenään. Vertailussa keskityttiin tarkastelemaan pääosin niitä ajanjaksoja, jolloin koekohteet olivat käyttämättöminä. Ikkunapintojen, seinäpinnan ja kylmän pinnan olosuhteita verrattiin ensisijaisesti keskeltä huonetta mitattuihin olosuhteisiin, joiden ajateltiin kuvaavan parhaiten kyseisen koekohteen sisäilmaolosuhteita. Lämmitettyjen koekohteiden tarkasteluissa ei ole mukana koekohteen 5 olosuhteita, koska kohdetta pidettiin peruslämmöllä.

Ikkunapintojen olosuhteet poikkesivat sisäilman olosuhteista muihin tarkastelupisteisiin nähden eniten. Lämmittämättömissä koekohteissa (koekohteissa 1-4, talvena 2007–2008) olosuhde-erot ikkunapinnan ja sisäilman välillä olivat melko pieniä, kun ulko-olosuhteet olivat vaihtelevia. Vakaampien tai hyvin nopeiden ulko-olosuhdemuutosten yhteydessä (esim. pakkasen kiristytessä usean vuorokauden ajan) erot kasvoivat suuremmiksi. Ottamatta huomioon hetkellisiä, hyvin nopeiden ulko-olosuhteiden aiheuttamia olosuhteita, ikkunapinnan lämpötila saattoi olla enimmillään n. $2 \text{ }^\circ\text{C}$ matalampi ja suhteellinen kosteus enimmillään 10...15 % RH korkeampi kuin sisäilmassa. Lukuun ottamatta koekohdetta 4 ikkunapintojen suhteelliset kosteudet pysyivät kuitenkin 90 % RH alapuolella. Koekohteessa 4 suhteellisen kosteuden maksimi-arvo oli ensimmäisen talvena 2007–2008 hetkellisesti n. 96 % RH ja toisena talvena 2008–2009 vakioteho-

lämmityksen katkaisemisen jälkeen usean tunnin ajan 100 % RH. Jälkimmäisessä tapauksessa on varmasti esiintynyt myös kondenssia.

Lämmitetyissä koekohteissa ikkunapintojen ja sisäilman väliset lämpötilaerot olivat suurempia. Lämmityksen vuoksi ikkunapintojen suhteelliset kosteudet olivat alle 80 % RH kaikissa muissa koekohteissa paitsi koekohteessa 4. Koekohteessa 4 vakioteholämmitys vaikutti merkittävästi koko asunnon kosteusolosuhteisiin, mutta joulu-tammikuun aikainen lämmitys ei riittänyt laskemaan ikkunapinnan suhteellisen kosteuden kuin 90 % RH -tason alapuolelle. Toisaalta asuntoa lämmitettiin tuolloin vain reilut kaksi kuukautta ja lämmitysjakson edetessä lämmityksen vaikutus näytti kasvavan. Ennen lämmityksen katkaisemista (tammikuun alussa) ikkunapintojen suhteellinen kosteus -taso oli jo lähempänä 80 % RH ja kohteen sisäolosuhteet näyttivät edelleenkin lähestyvän muiden lämmitettyjen (ja vähäisessä asuinkäytössä olleiden) koekohteiden olosuhteita.

Päiväsaikaan auringonsäteily vaikutti myös osaltaan ikkunapintojen lämpötiloihin, mikä oli havaittavissa koekohteiden itä-, etelä- ja länsipuolella sijaitsevilla ikkunoilla. Vuorokauden pimeänä aikana sekä aikana, jolloin auringonsäteily oli muuten heikkoa, eri ilmansuunnissa olevien ikkunoiden pintalämpötiloissa ei ollut puolestaan eroa.

Massiivihirren lämmön- ja kosteudensitomiskyvyn vuoksi olosuhteiden ulkoseinien sisäpinnassa ajateltiin muuttuvan sisäilmaan nähden hitaammin. Mittaustulosten perusteella seinien lämpötilamuutokset olivat kuitenkin useimmiten sisäilmaan nähden nopeampia, mikä johtunee osittain koekohteiden heikohkosta ilmatiiviyydestä ja ilmavuodoista hirsien saumoista. Sekä ulkoseinän sisäpinnalla että ns. kylmällä pinnalla olosuhteet poikkesivat sisäilman olosuhteista huomattavasti vähemmän kuin ikkunapinnoilla. Lämmittämättömissä koekohteissa lämpötilaerot seinäpinnan ja sisäilman välillä olivat enimmillään 1 °C aikana, kun kohteet eivät olleet käytössä. Suhteellisen kosteuden osalta ero oli korkeimmillaan n. 5 % RH. Lämmitetyissä koekohteissa erot olivat vastaavanlaiset.

Esiolettamuksesta poiketen koekohteiden kylmän pinnan olosuhteet eivät juuri eronneet sisäilmaolosuhteista. Korkeimmillaan erot olivat suurin piirtein samansuuruiset kuin ulkoseinien kohdalla.

Kondensoitumisen kannalta kriittisimmät tarkastelupisteet olivat pohjoisikkunoiden sisäpinnat. Koekohteen 4 toisen talven mittaustuloksista havaittiin usean tunnin mittaisia 100 % RH suhteellisia kosteuksia ikkunapintojen lisäksi myös sisäilmassa. Sisäilmaolosuhteet olivat itse asiassa kondensoitumisen kannalta kriittisemmät kuin ikkunapinnan olosuhteet (ks. liite 1), mikä vahvistaa käsitystä koekohteen erittäin kriittisistä sisäolosuhteista. Toisaalta on muistettava, että käytettyjen dataloggerien suhteellisen kosteuden mittatarkkuus heikkenee matalissa lämpötiloissa, minkä vuoksi on vaikea todeta, ovatko sisäilmaolosuhteet olleet todellisuudessa yhtä kriittisiä, mitä tulokset osoittavat.

Muissa lämmittämättömissä koekohteissa sisätilojen tarkastelupisteiden suhteelliset kosteuden pysyivät lähes poikkeuksetta turvallisella tasolla, alle 90 % RH. Näiden koekohteiden osalta on tosin muistettava, että mittausanturit eivät sijainneet kiinni tarkastelupinnoilla vaan noin 1,5 cm etäisyydellä. Lämmittämättömiä koekohteita oli mukana ainoastaan neljä ja kahta näistä käytettiin mittausjaksojen aikana enemmän tai vähemmän.

Koekohteen 4 kriittiset sisäolosuhteet johtuvat osittain kohteen hatarasta ilmatiiviyydestä, mikä ilmenee myös ulko-olosuhteita nopeasti seuranneista sisäolosuhteista, mutta olosuhteisiin on todennäköisesti vaikuttanut myös kohteen alapohjarakenne. Koekohde 4 on esitetty kuvassa 3.5.



Kuva 3.5 Koekohde 4.

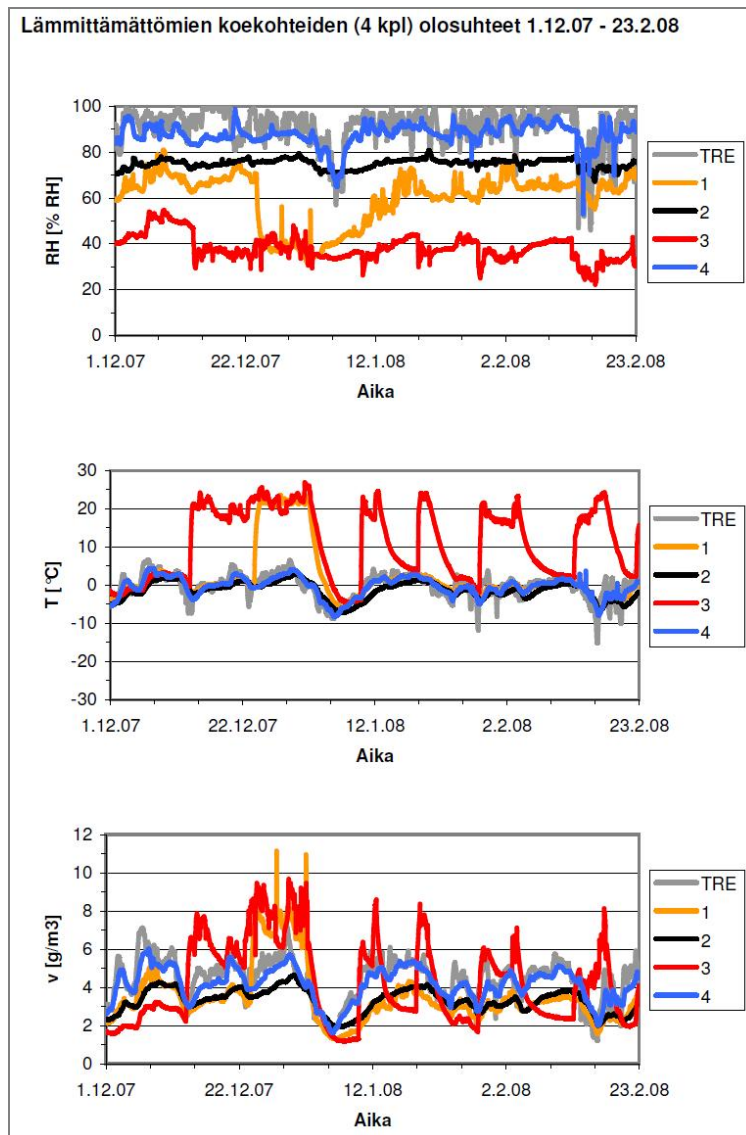
Kuvasta 3.5 voidaan havaita, että pilariperusteisen koekohteen alapohjan tuulettuminen on heikko peruspilarien välisen kivitäytön ja talven aikana rakennuksen viereen kertyvän lumen johdosta. Koekohteen alapohjarakenteesta tai siinä käytetystä höyrynsulkumateriaalista ei ole tarkkaa tietoa, mutta mikäli alapohjarakenne on kosteutta läpäisevä, maan ja ryömintätilan kosteutta siirtyy helposti rakennuksen sisätilaan.

Vapaa-ajan asuntojen sisätilojen homehtumisriskiä arvioitiin koekohteen 4 perusteella, koska kohteessa havaittiin olevan selvästi kriittisimmät sisäolosuhteet. Vaikka lämmittämättömän koekohteen 4 sisäolosuhteet olivat molempien talvien aikana suhteellisen kosteuden osalta kaikkein kriittisimmät, homemallin (Vinha et al. 2010) avulla arvioitu homehtumisriski oli kuitenkin olematon. Koekohteen 4 tarkastelupisteiden homeindeksit pysyivät hetkellisiä poikkeuksia lukuun ottamatta nollassa koko mittausjakson ajan. Maksimissaan homeindeksit olivat ainoastaan muutaman sadasosan nollan yläpuolella. Alhaiset homeindeksit johtuvat alhaisista lämpötiloista, sillä korkeat suhteelliset kosteudet ajoittuivat pääsääntöisesti ajalle, jolloin sisälämpötilat olivat joko nollan tuntumassa tai pakkasen puolella. Päivitetyllä homemallilla tehdyissä tarkasteluissa materiaalina käytettiin herkimmin homehtuvaa käsittelemätöntä, runsaasti ravinteita sisältävää puuta. Taantumakertoimena käytettiin männyn kerrointa.

Tuloksista voidaan todeta, että edes lämmittämättömien vapaa-ajan asuntojen sisäolosuhteet eivät ole yleensä homehtumisen kannalta kriittisiä. Tilannetta on (varsinkin koekohteen 4 osalta) edesauttanut se, ettei home kasva pakkasessa ja myös se, että homehtuminen vaatii alhaisissa (homemallin mukaan alle 20 °C) lämpötiloissa useimmiten huomattavasti 80 % RH korkeampaa suhteellista kosteutta. Tässä yhteydessä on myös huomattava, että vapaa-ajan asuntojen sisäolosuhteet riippuvat oleellisesti ulko-olosuhteista. Ilmaston lämpenemisen mahdollisesti aiheuttamat sademäärän kasvu, syksyn pidentyminen ja leudommat talvet (Ilmatieteen laitos 2010) tulisivat lisäämään merkittävästi homehtumisen kannalta kriittisten olosuhteiden esiintymistä myös asuntojen sisätiloissa. Toisaalta mittausjakso oli varsinkin leudon ensimmäisen talven 2007–2008 osalta jo nyt hyvin kriittinen (ks. kohta 3.2).

3.3.2 Koekohteiden väliset erot

Koekohteiden välisiä eroja tarkasteltiin vertaamalla eri koekohteissa keskeltä sisätilaa mitattuja olosuhteita keskenään. Tässä yhteydessä on esitetty lämpötila- ja kosteusmittauksissa saatuja tuloksia lämmittämättömissä ja kuivanapitolämmitettyissä koekohteissa. Mittaustuloksia tarkasteltaessa on syytä ottaa huomioon, että lämmittämättömien ja lämmitettyjen koekohteiden olosuhteet on mitattu eri vuosina. Esitetyt olosuhteet on mitattu sisätilan keskeltä ja vesihöyrypitoisuudet on määritetty laskennallisesti mitattujen lämpötilan ja suhteellisen kosteuden perusteella. Esitetyt ulkoilmaolosuhteet ovat Ilmatieteen laitoksen mittamia. Kuvassa 3.6 on esitetty lämmittämättömien koekohteiden mittaustulokset 1.12.07–23.2.08 väliseltä ajalta.



Kuva 3.6 Lämmittämättömien koekohteiden sisäilman olosuhteet ja ulkoilman olosuhteet Ilmatieteen laitoksen Tampereen sääasemalta 1.12.07–23.2.08. Yläkuvaajassa on suhteelliset kosteudet, keskellä lämpötilat ja alhaalla vesihöyrypitoisuudet.

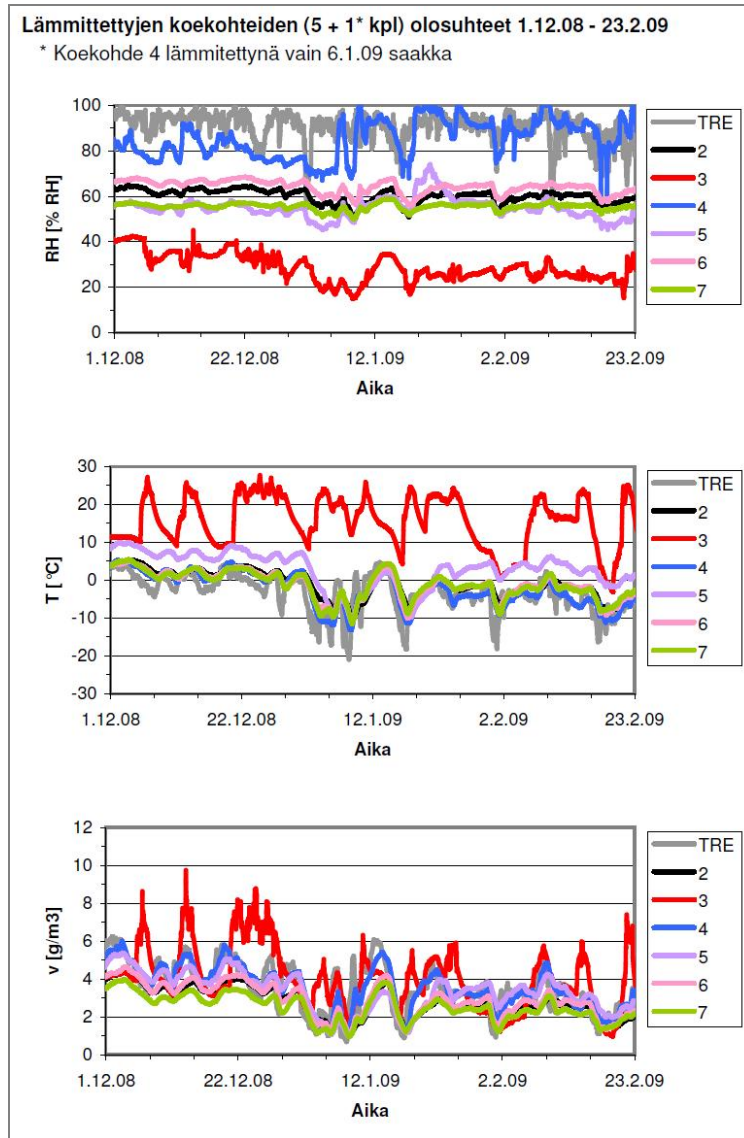
Kuvasta 3.6 havaitaan, että lämmittämättömien koekohteiden väliset erot olivat kosteusolosuhteiden osalta hyvin merkittäviä. Lämpötilaerot olivat pieniä asuntojen ollessa käyttämättömiä. Kosteusolosuhteiden osalta selvästi kriittisimmät olosuhteet olivat koekohteessa 4, jossa suhteelliset kosteudet olivat ajoittain hyvin korkeita, jopa yli 95 % RH. Kuvasta 3.6 havaitaan, että

sisäilman vesihöyrypitoisuus oli koekohteessa 4 jatkuvasti hyvin lähellä ulkoilman vesihöyrypitoisuutta. Ulkoilman vesihöyrypitoisuudessa tapahtuneet muutokset ovat siis vaikuttaneet koekohteen 4 sisäilman vesihöyrypitoisuuteen selkeämmin kuin muissa koekohteissa. Koekohteessa 4 myös ulkolämpötilasta aiheutuvat sisälämpötilamuutokset ovat olleet nopeimmat. Nopeiden olosuhdemuutosten vuoksi koekohteen sisäolosuhteet ovat olleet hyvin lähellä ulkoilmaolosuhteita. Tämä puolestaan viittaa siihen, että koekohteen heikolla ilmatiiveydellä ($n_{50} = 30 \text{ l/h}$) on ollut hyvin merkittävä vaikutus.

Suhteellisen kosteuden suhteen kuivimmat olosuhteet olivat koekohteessa 3. Vierailut koekohteessa olivat ajoittain nostaneet sisäilman vesihöyrypitoisuuden muihin koekohteisiin nähden korkeammaksi, mutta vierailujen jälkeen pitoisuus oli puolestaan muihin koekohteisiin nähden selvästi matalampi. Vierailujen päätyttyä kosteutta on siis sitoutunut vierailun aikana kuivuneisiin hirsipintoihin.

Lämmittämättömien koekohteiden välisiin sisäolosuhteiden välisiin eroihin on useita syitä, joista merkittävimmät ovat koekohteissa vieraileminen ja koekohteiden rakenteelliset erot, kuten vaipan ilmatiiviys ja lämmöneristys. Näiden lisäksi eroihin ovat vaikuttaneet myös paikallisten ulkoilmaolosuhteiden väliset erot sekä koekohteen ympäristön vaikutus, kuten varjostus tai tuulelta suojaavuus. Koekohteissa vieraileminen vaikutti osaltaan myös mittaustulosten vertailukelpoisuuteen. Esimerkiksi koekohteessa 3 ensimmäisen talven aikana pisin yhtäjaksoinen ajanjakso, jolloin kohde ei ollut käytössä (ja lämmitettynä) oli 18 vuorokautta. Jatkuvan vierailemisen johdosta kyseisessä koekohteessa ei saatu kuvaa millaiset sisäolosuhteet olisivat olleet, jos asuntoa ei olisi talven aikana käytetty. Koekohteen mittaustuloksia hyödynnettiin tosin arvioitaessa vierailemisten vaikutusta asunnon sisäilmaolosuhteisiin (ks. kohta 3.3.5).

Toisena talvena 2008–2009 kussakin koekohteessa oli käytössä vakiotehoinen kuivanapitolämmitys. Kuvassa 3.7 on esitetty kuivanapitolämmitettyjen koekohteiden mittaustulokset 1.12.08–23.2.09 väliseltä ajalta.



Kuva 3.7 Kuivanapitolämmitettyjen koekohteiden sisäilman olosuhteet ja ulkoilman olosuhteet Ilmatieteen laitoksen Tampereen sääasemalta 1.12.08–23.2.09. Yläkuvaajassa on suhteelliset kosteudet, keskellä lämpötilat ja alhaalla vesihöyrypitoisuudet.

Taulukossa 3.2 on esitetty koekohteiden ominaisuuksia, koekohteissa talven aikana toteutunut keskimääräinen lämmitysteho, joka on laskettu seuraten sähkönkulutuksen perusteella, ja toteutunut sisä- ja ulkoilman välinen lämpötilaero aikana, jolloin kohde ei ollut käytössä. Keskimääräinen huonekorkeus on määritetty tilavuuden ja pinta-alan osamääränä. Lämpötilaero on määritetty mittaustulosten perusteella. Koekohteiden 3 ja 4 osalta aikaa, jolloin kohteet olivat lämmittämättöminä, ei ole otettu huomioon lämmitystehon tai lämmityseron määrittämisessä. Koekohde 1 ei ollut mukana toisen talven mittauksissa.

Taulukko 3.2 Koekohteiden lämmitystehot ja toteutuneet lämpötilaerot talvena 2008–2009.

Koekohde nro	2	3	4	5	6	7
Tilavuus [m ³]	68	182	40	181	78	69
Kokonaispinta-ala [m ²]	24	75	17	66	27	28
Keskimääräinen huonekorkeus [m]	2,8	2,4	2,4	2,8	2,9	2,4
Toteutunut lämmitysteho [W]	210	780 *	110 *	800	220	140
Lämmitysteho neliölle [W/m ²]	8,8	10,4	6,5	12,1	8,1	4,9
Toteutunut lämpötilaero [°C]	3,1	8,0	2,6	7,0	3,1	3,1

Huom. * Koekohde oli osan mittausajasta lämmitettömänä.

Kuvasta 3.7 havaitaan, että toisena talvena, jolloin kaikkia koekohteita pidettiin kuivanapito-lämmityksellä, koekohteiden väliset olosuhde-erot eivät olleet yhtä suuria kuin edellistalvena (vrt. kuva 3.6). Lukuun ottamatta runsaassa käytössä ollutta koekohteita 3, olosuhde-erot koekohteiden välillä olivat melko pieniä. Myös kosteusolosuhteiden osalta kriittisimmän koekohteen 4 suhteellinen kosteus näytti lähestyvän muiden koekohteiden tasoa, kunnes koekohteen lämmitys katkaistiin 6.1.2009. Tämän jälkeen koekohteen sisäolosuhteet olivat lähellä ulkoilmaolosuhteita kuten edellisvuonna ja mitattu sisäilman suhteellinen kosteus oli ajoittain jopa 100 % RH eli kondenssia on voinut esiintyä. Vaikka koekohteen 4 suhteellinen kosteus oli ollut korkea, homemallin perusteella homeen kasvua ei kuitenkaan esiintynyt. Tämä on selitettävissä sillä, että korkeiden suhteellisten kosteuksien aikana sisälämpötila oli pakkasen puolella.

Kuivanapitolämmityksen johdosta koekohteiden 2, 5, 6 ja 7 suhteelliset kosteudet pysyivät tasanaisena 50–70 % RH välillä eli koekohteissa 2, 5 ja 6 edellistalveen nähden selvästi turvallisemmalla tasolla.

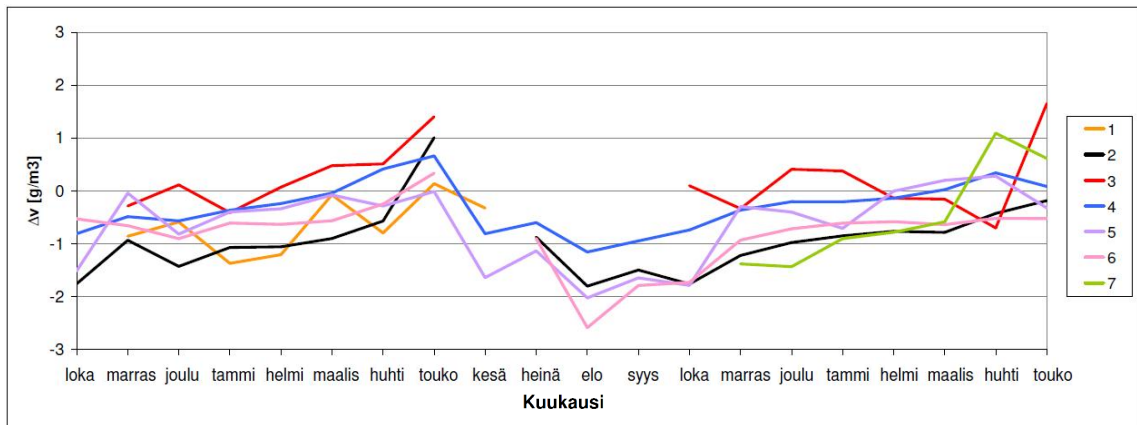
Vierailujen vaikutus koekohteen 3 mittaustuloksiin oli vastaavanlainen kuin edellisvuonna ja olosuhdemuutokset aikana, jolloin kohde ei ollut käytössä, olivat edelleen nopeimmat koekohteessa 4. Koekohteen 3 jälkeen suhteellisen kosteuden perusteella kuivimmat olosuhteet olivat koekohteissa 5 ja 7. Verrattaessa näiden koekohteiden olosuhteita kuvan 3.7 ja taulukon 3.2 valossa huomataan, että koekohteessa 5 sisälämpötila on ollut pääsääntöisesti useita asteita korkeampi kuin koekohteessa 7. Molemmat koekohteet olivat kohtalaisen ilmatiiviit, mutta koekohteessa 7 ilmanvaihtoreitit olivat suljettuna talven aikana (ks. taulukko 3.1). Pienen ilmanvaihdon vuoksi sisäilman vesihöyrypitoisuus oli noin 1 g/m³ matalampi kuin koekohteessa 5. Ilmanvaihto ja muihin koekohteisiin nähden parempi vaipan lämmöneristys ovat vaikuttaneet oleellisesti myös siihen, että muihin koekohteisiin nähden selvästi pienempi lämmitysteho oli riittävä. Taulukosta 3.2 nähdään, että koekohteessa 7 lämmitysteho oli vain n. 5 W neliötä kohden.

Taulukosta 3.2 havaitaan myös, että sisä- ja ulkoilman välille toteutuneet lämpötilaerot olivat suurimpia koekohteissa 3 ja 5. On kuitenkin huomattava, että koekohteen 3 osalta keskimääräisen lämpötilaeron määrittäminen oli vaikeaa kohteen runsaan käytön vuoksi. Vierailut vaikuttivat osaltaan myös niihin ajanjaksoihin, jolloin kohde ei ollut käytössä. Koekohteen 3 ilmatiiviys oli mukana olleiden koekohteiden keskinäisessä vertailussa keskitasoa ja koekohteen ilmanvaihtoreitit olivat mittausjakson ajan osittain suljettuina, mitkä ovat osaltaan vaikuttaneet korkeampaan lämpötilaeroon. Toteutuneelle lämpötilaerolle määritetty arvo ei kuitenkaan luultavasti vastaa arvoa, joka olisi saatu, mikäli koekohde olisi ollut pääsääntöisesti käyttämättömänä. Koekohteessa 5 korkeampaan lämpötilaeroon ovat vaikuttaneet kohteen hyvä ilmatiiviys ja il-

manvaihtoreittien osittainen sulkeminen. Muihin koekohteisiin nähden (ja lukuun ottamatta koekohdetta 7) myös lämmitysteho neliötä kohden oli hieman suurempi eli n. 12 W neliölle.

3.3.3 Sisäilman kosteussisällöt

Koekohteiden kuukausittaiset kosteussisällöt on esitetty kuvassa 3.8. Kuvasta havaitaan, että vapaa-ajan asuntojen sisäilmassa on pääsääntöisesti ulkoilmaan nähden kosteusvajetta. Lukuun ottamatta kevätaikaa tilanne on siis käytännössä päinvastainen jatkuvassa käytössä oleviin asuinrakennuksiin nähden. Ulkoilman vesihöyrypitoisuuden ollessa suurempi vesihöyryä kulkeutuu diffuusiolla rakenteen läpi ulkoa sisäänpäin, mutta myös sisä- ja ulkoilman välinen ilmanvaihtuvuus nostaa sisäilman vesihöyrypitoisuutta, koska korvausilma sisältää enemmän vesihöyryä kuin poistoilma.



Kuva 3.8 Koekohteiden sisäilman kosteussisällöt vuosina 2007–2009. Pystyakselin kosteussisältö kuvaa sisä- ja ulkoilman vesihöyrypitoisuuksien välistä erotusta.

Loppukesällä ja alkusyksyllä sisäilman kosteusvaje on suurimmillaan. Tilanne muuttuu talven myötä melko suoraviivaisesti siten, että keväällä voidaan olla kosteuslisän puolella. Mittaustulosten perusteella kevään ohella sisäilmassa on kosteuslisää myös vierailujen yhteydessä (ks. kuvat 3.6 ja 3.7), jolloin asumisen kosteustuotto nostaa sisäilman vesihöyrypitoisuutta. Vuoden-aikariippuvaiseen tilanteeseen vaikuttaa mm. sisäilmaan yhteydessä olevien materiaalipintojen kosteudensitomiskyky (ks. kohta 2.2.1). Syksyllä mm. hirsiseinien sisäpinnat sitovat voimakkaasti kosteutta lämpötilan laskemisen ja suhteellisen kosteuden kohoamisen seurauksena, mikä aiheuttaa sisäilmaan kosteusvajeen. Talven aikana hirret voivat hieman kuivua, mutta eivät merkittävässä määrin. Talven aikana hirsipinnat luovuttavat tai sitovat kosteutta vaihtelevasti sisäilman olosuhteista riippuen. Kevään tultua lämpötilan kohoaminen aloittaa hirsien voimakkaamman kuivumisen. Hirsien luovuttaessa kosteutta sisäilmaan muodostuu kosteuslisä ulkoilmaan nähden. Hirret kuivuvat myös kesän aikana, mutta kosteahkon ulkoilman vuoksi sisäilmassa on pääsääntöisesti kosteusvajetta aikoina, jolloin asunto ei ole käytössä.

Kuvasta 3.8 nähdään, että ainoastaan koekohteessa 3 sisäilmassa oli ulkoilmaan nähden enemmän kosteutta molempien talvien aikana. Talven aikainen kosteuslisä johtui koekohteen runsaasta käytöstä. Toisena talvena myös koekohteessa 5 oli helmi- ja maaliskuussa pääsääntöisesti kosteuslisää. Tämän koekohteen osalta kosteuslisä ei kuitenkaan johtunut ainoastaan vierailuista, sillä tulosten perusteella kohteessa ei käyty helmikuussa ollenkaan ja maaliskuussa ainoas-

taan kerran, kuukauden viimeisten päivien aikana. Koekohteen tilanteeseen on voinut vaikuttaa ilmanvaihtokanavien pitäminen osittain avoinna aikoina, jolloin kohde ei ollut käytössä.

Kuvan 3.8 perusteella voidaan todeta, että kosteuden kulkeutumista ulkoa sisäänpäin tulisi estää, jotta sisäilman vesihöyrypitoisuus pysyisi mahdollisimman alhaisena. Tämä onnistuu esim. rajoittamalla sisä- ja ulkoilman välistä ilmanvaihtuvuutta silloin, kun sisäilmassa on vähemmän kosteutta kuin ulkoilmassa.

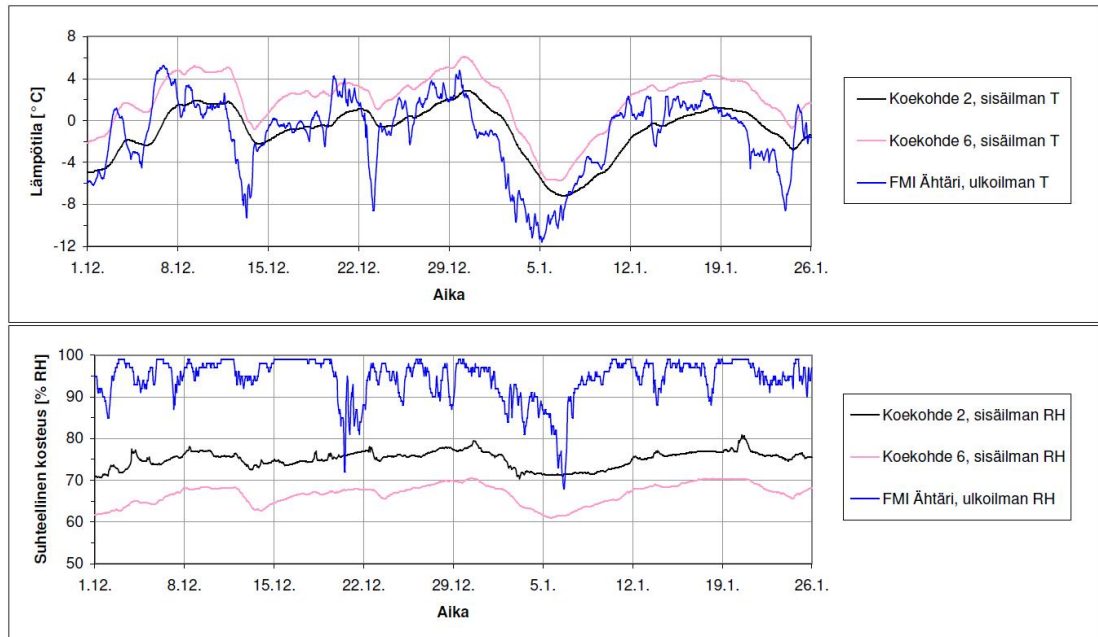
Massiivihirsirakenteisissa mökeissä ilmanvaihtoreitit voidaan sulkea kokonaan loppukesällä. Ilmanvaihdon sulkeminen vaikuttaa suotuisasti sisäilman kosteusolosuhteisiin talvella, loppukesällä ja syksyllä. Ilmanvaihto tulisi pitää avoinna vierailujen yhteydessä sekä kevätaikaan, jolloin sisäilman vesihöyrypitoisuus on yleensä suurempi kuin ulkoilmassa. Ilmanvaihdon pienentäminen vaikuttaa kosteusolosuhteiden lisäksi suotuisasti myös lämmitysenergian kulutukseen, sillä ilmanvaihdon lämpöhäviöt pienentyvät. Myös Seppänen (2001) on todennut, että lämmitysenergian säästämiseksi epäjatkuvässä käytössä olevien rakennusten ilmanvaihto tulisi minimoida käyttöjaksojen ulkopuolella.

Koekohdetta 7 voidaan pitää hyvän ilmatiivyyden ja ilmanvaihtoreittien sulkemisen vuoksi käytännössä ainoana koekohteena (ks. taulukko 3.1), jossa ilmanvaihto oli suljettuna koko mittausjakson ajan. Koekohteen 7 mittauksien perusteella ilmanvaihdon rajoittaminen ei vaikuta haitallisesti sisäilman olosuhteisiin edes kevätaikaan (ks. liite 1). Koekohteen omistajan mukaan ilmanvaihtoreitit ovat olleet suljettuna myös mittauksia edeltävinä vuosina eikä ongelmia ole koskaan havaittu.

Ilmanvaihdon sulkemisen johdosta sisäilman suhteellisen kosteuden tulisi pysyä alhaisempana, mikä vähentää puolestaan materiaaleista irtoavien pienhiukkasten määrää. Toisaalta ilmanvaihdon sulkeminen kasvattaa sisäilman pienhiukkaspitoisuutta rajoittamalla niiden poistumista ilmanvaihdon kautta. Sen vuoksi on vaikea sanoa, kummassa tapauksessa sisäilman pienhiukkaspitoisuus on suurempi. Mökille saavuttaessa sisätiloja voidaan kuitenkin tuulettaa voimakkaasti ja korvata siten ns. seissyt sisäilma puhtaammalla ulkoilmalla. Ilmanvaihdon merkityksestä tarvitaan joka tapauksessa lisätutkimusta.

3.3.4 Vakioteholämmityksen vaikutus sisäilmassa ja ikkunapinnalla

Kuvassa 3.9 on esitetty talvella 2007–2008 koekohteissa 2 ja 6 keskeltä rakennuksen sisätilaa mitatut olosuhteet kahdeksan viikon ajalta sekä ulko-olosuhteet Ilmatieteen laitoksen Ähtärin säämittausasemalta. Kyseiset Keuruulla sijainneet koekohteet olivat hyvin samanlaisia: ne olivat lähes samankokoisia ja molemmat olivat ilmatiiviydeltään hataria. Tarkastelujaksolla koekohde 2 oli lämmittämättömänä ja koekohteessa 6 oli käytössä 200 W:n vakioteholämmitys, joka vastaa kuivanapitolämmityksen perusmallia.

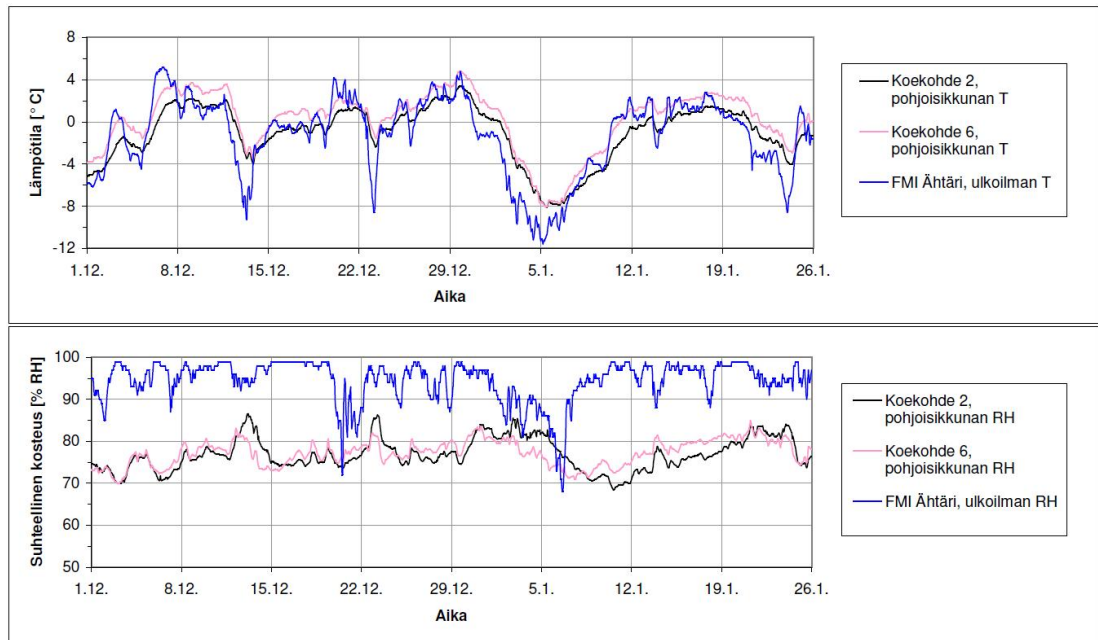


Kuva 3.9 Koekohteiden 2 ja 6 sisäolosuhteet ja ulko-olosuhteet 1.12.2007–26.1.2008.

Koko talven mittaustulokset olivat vastaavanlaisia kuin kuvassa esitettynä ajankohtana. Kuvasta havaitaan, että molemmissa koekohteissa sisäolosuhteet seurasivat ulko-olosuhteita lyhyellä viiveellä. Koekohteessa 6 sisälämpötila oli pääsääntöisesti n. 3 °C korkeampi ja suhteellinen kosteus vastaavasti n. 10 % RH matalampi kuin koekohteessa 2. Pakkasen kiristytessä koekohteiden välinen lämpötilaero oli pienempi, mutta suhteellisen kosteuden osalta ero pysyi jatkuvasti lähes samansuuruisena.

Koekohteessa 6 sisälämpötila oli aina ulkolämpötilaa korkeampi, lukuun ottamatta lyhyitä ajanjaksoja, jolloin ulkolämpötila kohosi hyvin voimakkaasti. Koekohteessa 2 sisälämpötila oli puolestaan vaihtelevasti ulkolämpötilan molemmin puolin. Kovalla pakkasella myös koekohteessa 6 sisälämpötila laski pakkasen puolelle.

Kuvassa 3.10 on esitetty koekohteiden 2 ja 6 pohjoisikkunoiden ja ulkoilman olosuhteet vastaavalta ajanjaksolta. Kuvasta nähdään, että eri koekohteiden pohjoisikkunan olosuhteet eivät eronneet toisistaan yhtä paljon kuin sisäilman osalta. Pohjoisikkunalla mitattu lämpötila oli koekohteessa 6 pääsääntöisesti noin 2 °C:ta korkeampi kuin koekohteessa 2, mutta suhteellisessa kosteudessa eroa koekohteiden välillä ei juuri ollut tai ainakaan lämmityksen ei voida sanoa parantaneen tilannetta.



Kuva 3.10 Koekohteiden 2 ja 6 pohjoisikkunan olosuhteet ja ulko-olosuhteet 1.12.2007–26.1.2008.

Lämmityksellä voidaan kuitenkin katsoa olleen suotuisa vaikutus myös pohjoisikkunan kosteusolosuhteisiin, vaikka ikkunapinnoilla erot koekohteiden välillä olivat pienemmät kuin sisäilmassa. Tämä on perusteltavissa korkeamman pintalämpötilan lisäksi koko ensimmäisen talven aikana mitattujen suhteellisten kosteuksien maksimiavojen välisillä eroilla. Koekohteessa 2 korkein pohjoisikkunalta mitattu suhteellinen kosteus oli 91 % RH ja koekohteessa 6 vastaavasti 86 % RH.

Koekohteen 6 vakioteholämmitys piti mökin sisäilman suhteellisen kosteuden hyvällä tasolla. Kuivanapitolämmityksen käyttöönotossa tulee kuitenkin ottaa huomioon, että kondensoitumisen kannalta kriittisimmillä ikkunapinnoilla lämmityksen vaikutus ei ole yhtä merkittävä kuin rakennuksen sisäilmassa. Ilmiö havaittiin myös verrattaessa ensimmäisenä talvena lämmittämättömänä ja toisena talvena vakioteholämmityksellä olleiden koekohteiden eri talvien aikaisia olosuhteita.

3.3.5 Vierailujen vaikutus

Vierailut ja niiden aikainen asunnon lämmittäminen vaikuttivat huomattavasti koekohteiden sisäolosuhteisiin, mikä on havaittavissa erityisesti koekohteiden 1 ja 3 mittaustuloksista (ks. kuvat 3.6 ja 3.7 sekä liite 1). Asunnon lämmittämisen seurauksena sisäilman suhteellinen kosteus laski voimakkaasti ja pysyi kohtalaisen alhaisena niin pitkään kuin asuntoa pidettiin asumislämmöllä. Pitkäaikaisen mökkivierailun päätyttyä suhteellinen kosteus ei kuitenkaan muuttunut yhtä voimakkaasti kuin lämmittämisen alkaessa. Pitkäkestoisen vierailun jälkeen sisäilman suhteellisen kosteuden tasaantuminen kesti huomattavasti pidempään kuin lämpötilan tasaantuminen: kun sisälämpötilan tasaantuminen ulkoilman suhteen kesti useita vuorokausia, suhteellisen kosteuden tasaantuminen saattoi viedä jopa pari viikkoa. Ilmiö on havaittavissa kuvassa 3.6 koekohteen 1 mittaustuloksista tammikuun kahden ensimmäisen viikon aikana. Koekohteessa 3 sisäilman suhteellinen kosteus pysyi runsaan käytön vuoksi koko kenttämittausten ajan erittäin alhaisena ja jopa niin alhaisena, että suhteellisen kosteuden perusteella asuntoa ei olisi ollut tarvetta lämmittää lainkaan.

Tulosten perusteella voidaan todeta, että talviaikaiset vierailut kuivattavat vapaa-ajan asuntoa. Ilmiö johtuu erityisesti materiaalien kosteussitomiskyvyssä tapahtuvista muutoksista: sisäilman lämpeneminen ja sitä seuraava suhteellisen kosteuden laskeminen vaikuttavat yhdessä niin, että hirret eivät kykene enää sitomaan yhtä paljon kosteutta (ks. kohta 2.2.1), jolloin ne alkavat kuivua haihduttaen osan kosteudestaan sisäilmaan. Hirsien kuivumisen ja asumisen aiheuttama vesihöyrypitoisuuden kasvu kompensoituu pääosin sillä, että ilmanvaihdon kautta kosteaa sisäilmaa poistuu ja tilalle virtaa kuivaa ulkoilmaa. Asunnolta poistuttua sisälämpötila alkaa laskea ja suhteellinen kosteus kohota, jolloin vierailun aikana kuivuneet hirsipinnat kykenevät jälleen sitomaan itseensä enemmän kosteutta. Kosteutta siirtyessä hirsiiin sisäilman suhteellinen kosteus voi pysyä normaalia tasoa alhaisempana useiden vuorokausien tai jopa viikkojen ajan.

Sisäpinnaltaan hygroskooppiset rakenteet parantavat siis koko rakennuksen kosteusteknistä toimintaa. Massiivihirsiseinän lisäksi ilmiö on mahdollinen myös sisäpuolelta puuverhoilluissa seinissä tai yläpohjissa, sillä suhteellisen kosteuden muutoksiin vaikuttaa oleellisesti ainoastaan rakenteen pintakerros.

3.3.6 Auringonsäteilyn vaikutus

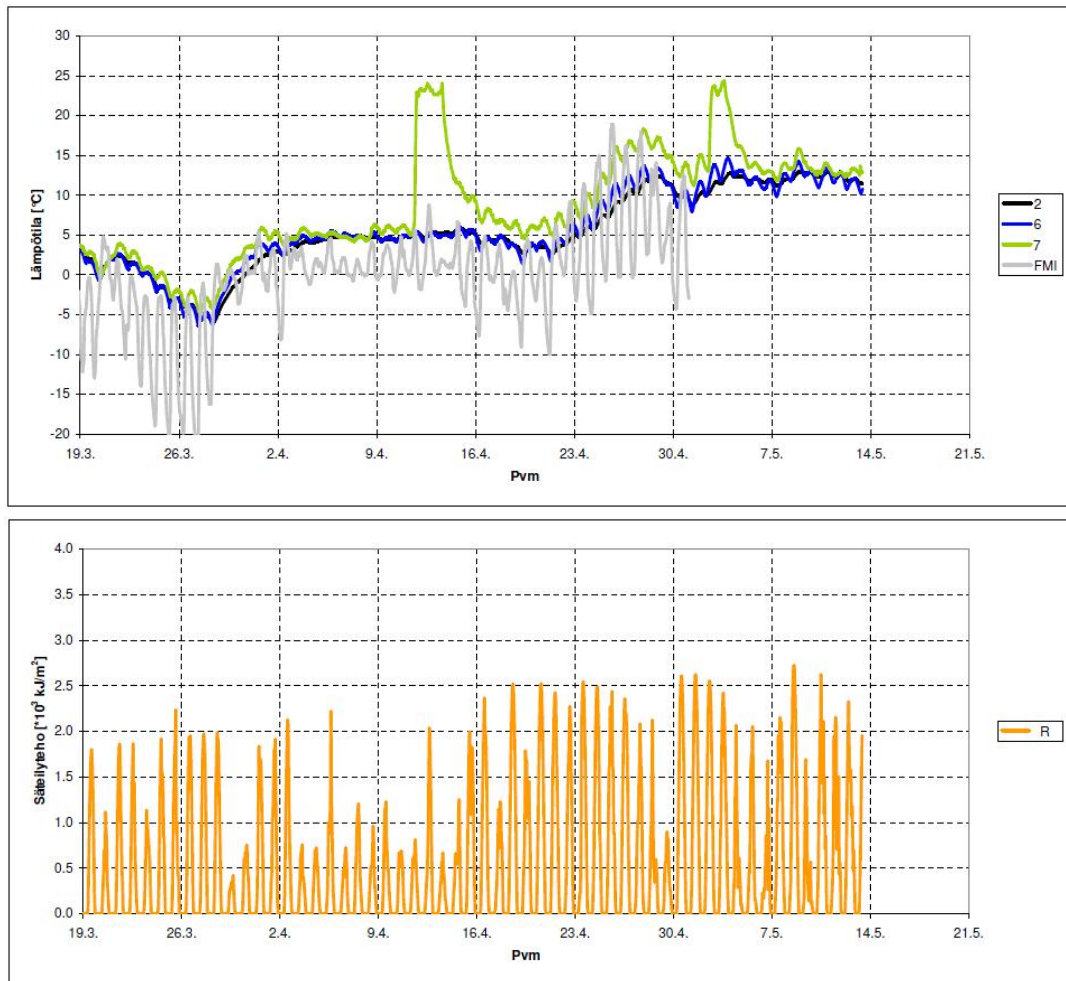
Auringonsäteilyn vaikutusta pyrittiin selvittämään tarkastelemalla voimakkaan auringonsäteilyn vaikutusta koekohteiden sisäolosuhteisiin ja vertaamalla eri tavoin säteilylle altistuvien koekohteiden sisäolosuhteita keskenään. Tarkasteluissa otettiin huomioon ainoastaan keskeltä rakennusta sisäilmasta mitatut olosuhteet.

Koekohteiden keskinäiseen vertailuun valittiin koekohteet 2, 6 ja 7, koska mittausjakson aikana ne olivat hyvin vähäisessä käytössä tai niissä ei vierailtu ollenkaan. Koekohteet 2 ja 6 sijaitsivat lisäksi samalla paikkakunnalla ja olivat vaipan ominaisuuksien suhteen hyvin samanlaisia. Nämä kaksi koekohteita erosivat kuitenkin sen suhteen, että koekohteessa 2 oli käytetty koko talven ajan itäjulkisivulle asennettua suojapeitettä, jonka oli tarkoitus suojata rakennusta voimakkaalta tuulelta. Suojapeitteen voidaan katsoa heikentäneen tuulen ohella merkittävässä määrin myös auringonsäteilyn vaikutusta. Koekohde 7 erosi kahdesta edellisestä koekohteesta mm. siinä, että se oli ilmanpitävyyden osalta huomattavasti tiiviimpi. Kaikissa kolmessa koekohteissa suurimmat ikkunat oli suunnattu itään ja tarkasteluissa esitettynä ajanjaksona koekohteita pidettiin vakioteholämmityksessä. Koekohteet on esitetty kuvassa 3.11.



Kuva 3.11 Koekohteiden 2, 6 ja 7 itä- ja pohjoisjulkisivut. Ylhäällä on koekohde 2, keskellä koekohde 6 ja alhaalla koekohde 7.

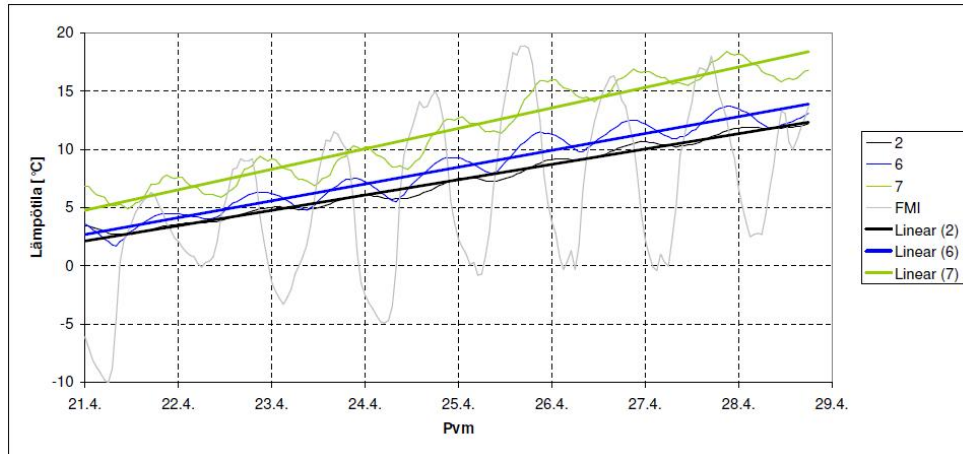
Tarkasteluissa havaittiin, että myös auringonsäteilyn vaikutus on melko vaikeasti havaittavissa varsinkin talviaikaan, jolloin koekohteiden sisäolosuhteiden väliset erot olivat hyvin pieniä myös suhteellisen voimakkaan säteilyn aikana. Keväällä, säteilyn lisääntyessä, säteilyn vaikutus oli selvemmin havaittavissa. Kuvassa 3.12 on esitetty keväällä 2009 mitatut lämpötilat ja auringon säteilytiedot. Säteilyteho on mitattu Jyväskylän säämittausasemalta ja ulkoilman lämpötila Ähtärin säämittausasemalta.



Kuva 3.12 Auringonsäteilyn vaikutus koekohteiden 2, 6 ja 7 sisälämpötilaan.

Kuvasta 3.12 havaitaan, että lämpötila on muuttunut nopeimmin koekohteessa 7 ja hitaimmin koekohteessa 2. Koko tarkastelujakson ajan koekohteen 2 sisälämpötila on ollut koekohteisiin 6 ja 7 nähden tasaisempi, mikä johtunee suojapeitteestä. Laajemmassa kenttämittaustulosten tarkastelussa havaittiin tilanteen olevan vastaavanlainen koko kenttämittausten ajan. Päiväsaikaan koekohteiden 6 ja 7 sisälämpötilat ovat kohonneet selvästi enemmän kuin koekohteessa 2. Tässä yhteydessä on kuitenkin todettava, että koekohteen 2 suojapeite on luultavasti heikentänyt myös tuulen vaikutusta pienentäen ilmanvaihtuvuutta ja sitä kautta lämpötilamuutoksia. Lisäksi koekohteen 2 muihin koekohteisiin nähden paremmalla rakennusvaipan lämmöneristävyydellä on ollut osaltaan vaikutusta hitaampiin lämpötilamuutoksiin (ks. taulukko 3.1).

Kenttämittausten aikana oli oikeastaan vain yksi ajankohta, jolloin koekohteiden väliset lämpötilaerot ja sisälämpötilan muutoserot olivat selvästi havaittavissa. Tämä ajanjakso 21.4.–28.4.2009 on nähtävissä myös kuvassa 3.12. Kuvassa 3.13 kyseistä ajankohtaa on tutkittu tarkemmin pyrkien selvittämään auringonsäteilyn vaikutusta lämmitysenergiankulutukseen. Auringonsäteilyn vaikutuksen arvioiminen tehtiin oletuksella, jonka mukaan lämpötilamuutoksen suuruuteen eri koekohteiden välillä on vaikuttanut ulkolämpötilan ohella ainoastaan auringonsäteily. Todellisuudessa eroihin on vaikuttanut useammat eri tekijät, joita on lueteltu jäljempänä. Koekohteen 2 osalta tehtiin lisäksi oletus, että suojapeitteen vuoksi auringonsäteilyllä ei ollut minkäänlaista vaikutusta koekohteen sisälämpötilaan.



Kuva 3.13 Koekohteiden 2, 6 ja 7 sisälämpötilat 21.4.–28.4.2009 välisenä aikana sekä niiden perusteella määritetyt lineaariset kehityssuunnat.

Kuvassa 3.13 esitettynä ajanjaksona koekohteessa 7 oli muihin kohteisiin nähden korkeampi sisälämpötila, koska kohteessa vierailtiin ennen tarkastelujaksoa 11.4.–13.4. välisenä aikana. Korkeammalla sisälämpötilalla ei ole kuitenkaan ollut merkittävää vaikutusta seuraavaksi esitetyssä tarkastelussa saatuihin tuloksiin.

Lämpötilamuutosten suuruudet arvioitiin kuvassa esitettyjen lineaaristen kehityssuuntien avulla. Näiden perusteella koekohteiden 2, 6 ja 7 lämpötilat muuttuivat tarkastelujaksolla 10,1; 11,2 ja 13,6 °C. Olettaen, että auringonsäteily ei vaikuttanut koekohteen 2 sisälämpötilaan, auringonsäteilyn vaikutus oli koekohteiden 6 ja 7 osalta 1,1 ja 3,5 °C. Olettaen, ettei auringonsäteily ollut ehtinyt vaikuttaa lämpötilaeroihin vielä tarkastelujakson alussa, auringonsäteilyn keskimääräinen vaikutus oli 0,55 °C koekohteessa 6 ja 1,75 °C koekohteessa 7. Mikäli kuivanapitolämmityksellä tavoitellaan sisä- ja ulkoilman välille esim. 5 °C asteen lämpötilaeroa, tarkastelujakson aikana lämmitystehon säästö olisi ollut 11 % koekohteessa 6 ja 35 % koekohteessa 7.

Arvioitaessa vuoden mittaan syntyvää säästöä, lämmityskauden voidaan katsoa kestävän syyskuun alusta toukokuun loppuun. Kuvassa 3.13 esitetyn tarkastelujakson aikana auringonsäteilytehon keskiarvo oli 810 kJ/m², kun koko lämmityskaudella (2008–2009) keskiarvo oli 196 kJ/m². Säteilytehon keskimääräinen arvo oli siis n. 24 % esitetyn tarkastelujakson tasosta. Yleistettäessä edellä esitetty tarkastelu koskemaan koko lämmityskautta, lämmitystehon säästön voidaan olettaa olleen 2,7 % ($0,24 \cdot 11$ %) koekohteessa 6 ja 8,5 % ($0,24 \cdot 35$ %) koekohteessa 7. Energiansäästö edellyttää tietenkin jollain tavoin älykästä, kuten esim. lämpötilaohjattua kuivanapitolämmitystä, jotta järjestelmä havaitsee tilanteet, jolloin lämmitystehoa voidaan laskea. Lämmitysenergian säästöä laskettaessa on myös huomattava, että säästö on huomattavasti merkittävämpi, jos tavoitelämpötilaero on esim. kolme astetta viiden asteen sijasta.

Tarkastelujen tuloksia arvioitaessa on kuitenkin huomattava, että tarkasteluun liittyy useita epävarmuustekijöitä. Todellisuudessa koekohteiden sisälämpötiloihin vaikuttaa monia muita tekijöitä, joita tarkasteluissa ei otettu huomioon. Tarkastelun lähtöoletuksista poiketen auringonsäteily on vaikuttanut jossain määrin myös koekohteen 2 olosuhteisiin itäjulkisivulla olleesta suojapeitteestä huolimatta, sillä säteilyä on tullut sisätilaan myös etelä-, länsi- ja pohjoisjulkisivuilla olevien ikkunoiden kautta, vaikka ikkunapinta-alat ovat olleetkin itäjulkisivuun näh-

den pienempiä. Toisaalta auringonsäteilyn vaikutukseen koekohteissa 6 ja 7 on vaikuttanut ympäristön ja ulkonevien rakenteiden aiheuttamat varjostukset.

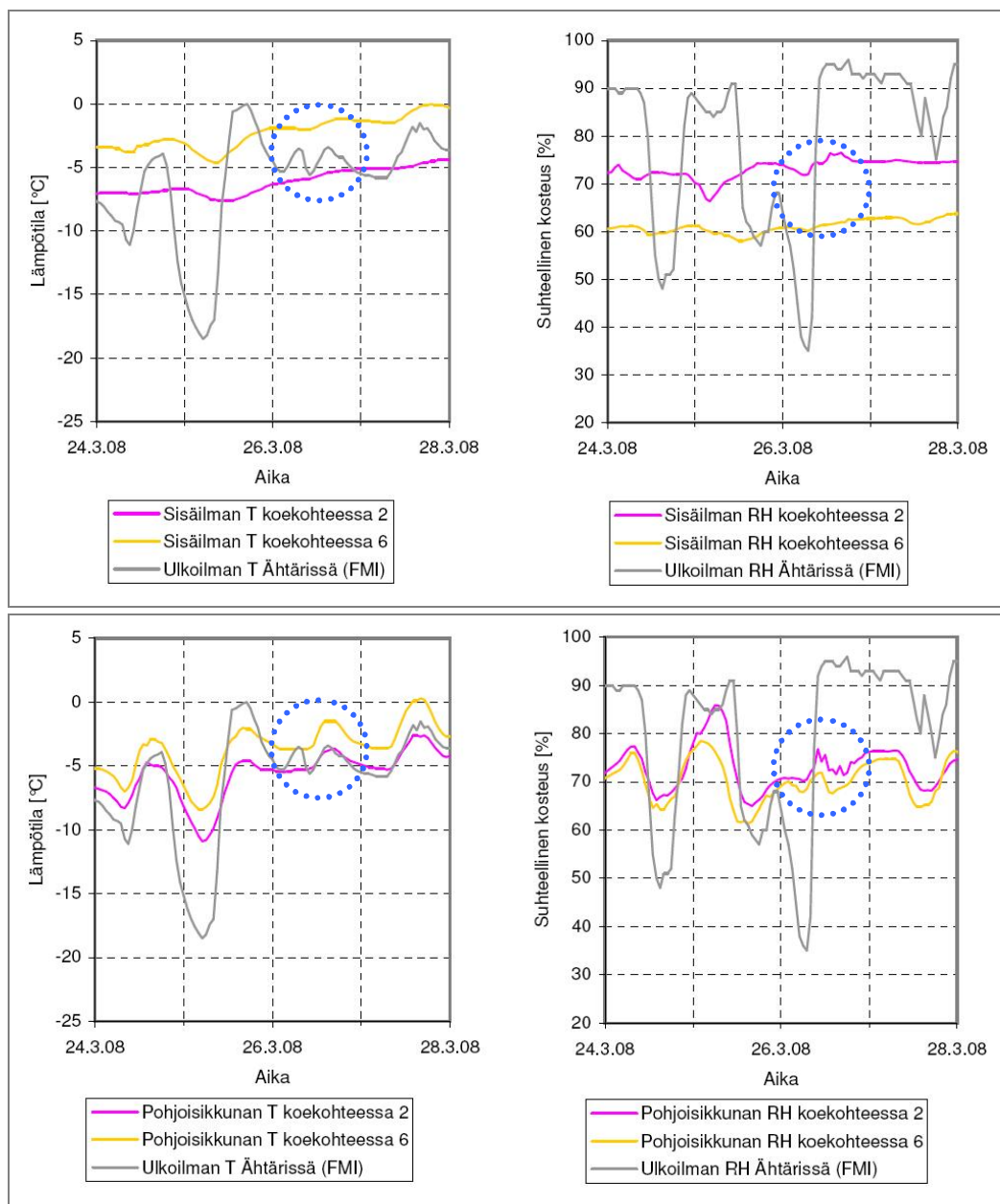
Yksinkertaistetussa tarkastelussa myöskään tuulen vaikutusta mittaustuloksiin ei pyritty selvittämään erikseen. Tuuli aiheutti osaltaan koekohteiden välisiä eroja vaikuttamalla enemmän ilmanpitävyydeltään hatarien koekohteiden 2 ja 6 olosuhteisiin. Toisaalta koekohteen 2 suojapeite heikensi tuulen vaikutusta. Tarkastelujen perusteella auringonsäteily vaikutti eniten koekohteen 7 sisälämpötilaan. Koekohteessa ympäristön ja ulkonevien rakenteiden aiheuttaman varjostukseen voidaan katsoa olevan vähäisin (ks. kuva 3.11), mutta muihin koekohteisiin nähden paremmalla ilmanpitävyydellä on ollut myös merkittävä vaikutus. Mittaustuloksista on kuitenkin vaikea päätellä, kuinka suuri oli paremman ilmanpitävyyden merkitys esim. esitettynä tarkasteluajanjaksona. Muita rakenteellisia tekijöitä, jotka ovat vaikuttaneet koekohteiden lämpötiloihin, ovat mm. vaipan lämmöneristys, sisätilan huonekorkeus sekä ikkunoiden koot, tyypit ja suuntaukset. Lisäksi on huomattava, että koekohde 7 sijaitsi eri paikkakunnalla kuin koekohteet 2 ja 6, jolloin ilmastolliset erot ovat osaltaan vaikuttaneet tuloksiin.

Mainittakoon vielä, että mittaustulosten valossa ei voida sanoa, oliko koekohteessa 2 käytetystä sääsuojauksesta enemmän haittaa vai hyötyä, vaikka em. tarkasteluissa suojauksen katsottiin aiheuttaneen ainoastaan haittaa heikentämällä auringonsäteilyn vaikutusta. Näin sen vuoksi, että suojaus heikensi säteilyn ohella huomattavasti myös tuulen vaikutusta tämän tiiveydeltään hataran koekohteen sisäolosuhteisiin.

3.3.7 Tuulen vaikutus

Tuulisuuden vaikutusta tarkasteltiin ensimmäisen talven 2007–2008 kenttämittaustulosten ja Ilmatieteen laitoksen tuulihavaintojen perusteella. Tässä luvussa tuulisuuden vaikutusta on tarkasteltu kahdessa Keuruulla sijaitsevassa koekohteessa. Koekohteet olivat ilmatiiviydeltään lähes yhtä hataria. Tarkastelujakson aikana koekohde 2 oli lämmittämättömänä ja koekohteessa 6 oli käytössä vakiotehoinen kuivanapitolämmitys. Tuuli kasvattaa rakennuksen sisä- ja ulkopuolen välistä paine-eroa, jolloin ilmanvaihto tehostuu. Tehostuneen ilmanvaihdon ja sen johdosta kasvaneiden ilmanvaihdon lämpöhäviöiden seurauksena vakiotehoksen lämmityksen vaikutus tulisi heikentyä, mikä tulisi olla havaittavissa sisä- ja ulkoilman välisen lämpötilaeron pienentymisenä.

Kuvassa 3.14 on esitetty koekohteiden 2 ja 6 sisäilman ja pohjoisikkunapinnan olosuhteet sekä ulkoilmailmaolosuhteet Keuruun säämittausasemalta. Kuvassa esitetyllä tarkastelujaksolla tuuli oli voimakkainta 26.3.08, jolloin tuulen nopeus oli n. 14 tunnin ajan 4...7 m/s. 24.3.–25.3. ja 27.3. tuulen nopeudet olivat pääsääntöisesti alle 2 m/s. Ajankohta, jolloin tuuli oli voimakkain, on merkitty kuvaan sinisellä pistekatkoviivalla.



Kuva 3.14 Tuulen vaikutus koehteiden 2 ja 6 sisäilman (ylhäällä) ja pohjoisikkunan (alhaalla) olosuhteisiin.

Tuulen vaikutuksesta sisäilman lämpötilaero lämmitetyn koehteeseen 6 ja lämmittämättömän koehteeseen 2 välillä tulisi pienentyä. Kuvasta 3.14 havaitaan, että tuulen vaikutus on kuitenkin ollut hyvin vähäinen. Sisäilman lämpötiloista voidaan havaita, että voimakkaan tuulen aikana lämmityksen vaikutus on hieman heikentynyt. Sitä, kuinka merkittävä tuulen vaikutus on ollut, on kuitenkin vaikea päätellä, sillä vastaavanlaisia notkahduksia koehteeseen 6 sisälämpötilassa on havaittavissa myös 24. ja 25. päivänä, jolloin tuuli on ollut heikohkoa. Ulkoilman muiden olosuhteiden vaikutus koehteiden sisäolosuhteisiin on puolestaan ollut huomattavasti merkittävämpi kuin tuulella.

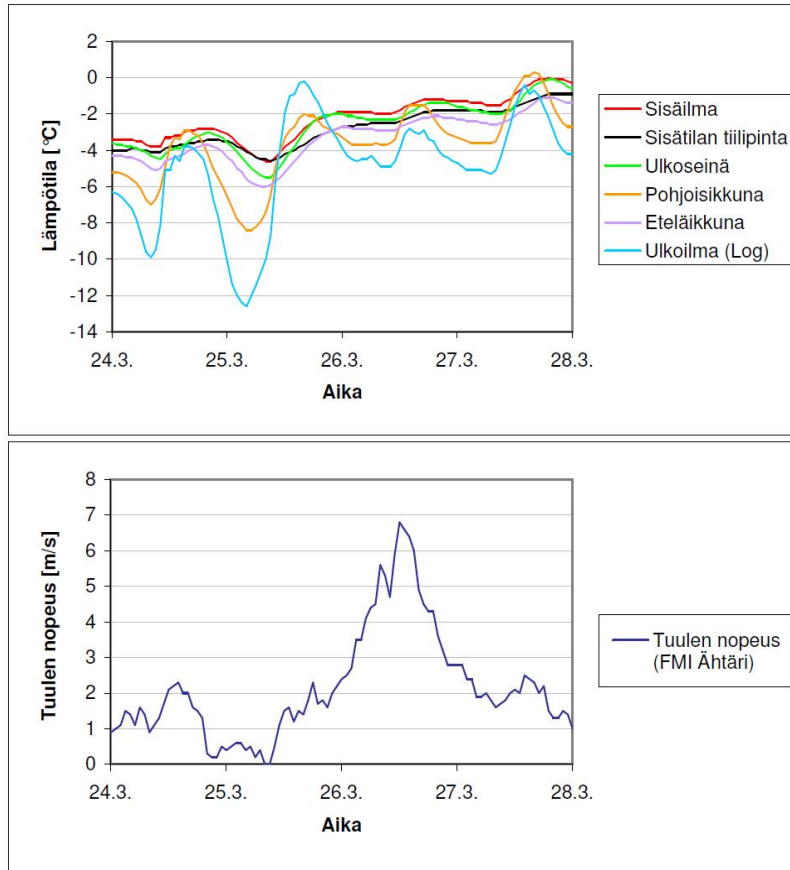
Tuulen vaikutus havaitaan selkeimmin koehteeseen 2 pohjoisikkunalla. Voimakas tuuli on nopeuttanut suhteellisen kosteuden muutoksia, mikä nähdään suhteellisen kosteuden käyrässä ns. sahaamisena. Ilmiö saattaa olla seurausta ikkunanpuitteiden ilmapuodoista, vaikkakin sahaamis-

ta ei ole havaittavissa lämpötiloissa. Vakiolämmöllä olevassa koekohteessa suhteellinen kosteus näyttäisi pysyneen tasaisempaan myös voimakkaan tuulen aikana.

Myöskään muiden koekohteiden tarkasteluissa tuulen vaikutusta koekohteiden sisäolosuhteisiin ei ollut selvästi havaittavissa. Yksi syy lienee, ettei tarkastelujakson aikana ollut ajanjaksoja, jolloin voimakas tuuli olisi myös pitkäkestoinen. Kenttämittausten aikana ei myöskään esiintynyt poikkeuksellisen voimakkaita tuulia ja voimakkaat tuulet olivat muutenkin harvinaisia. Esimerkiksi Ähtärissä marraskuun 2007 ja kesäkuun 2008 välisenä aikana yli 4 m/s tuulen nopeuksia havaittiin vain kymmenisen kertaa ja usein ne kestivät korkeintaan muutamia tunteja.

Laajemmissa tuulitarkasteluissa koekohteiden sisälämpötilamuutosten havaittiin olevan ensisijaisesti riippuvaisia ulkolämpötilasta ja sisä- ja ulkoilman lämpötilaerosta. Mittaustulosten valossa tuulen vaikutus sisälämpötilaan oli ulkolämpötilan vaikutuksen rinnalla hyvin pieni. Lisäksi ulkolämpötilat muuttuivat jatkuvasti, mikä vaikeutti tarkasteluja entisestään. Tuulella havaittiin tosin olevan selkeä yhteys ulkolämpötilaan. Tuulitarkasteluihin vaikutti myös vertailukelpoisen mittaustiedon vähyys, joka johtui mm. koekohteiden käytöstä mittausajanjakson aikana.

Tarkasteltaessa tuulen vaikutusta koekohteen eri mittauspisteiden olosuhteisiin selvisi tuulella olevan sisäilmaan nähden hieman merkittävämpi vaikutus mm. koekohteen ikkunapintojen olosuhteisiin. Tuulen vaikutusta eri tarkastelupisteistä on pyritty havainnollistamaan kuvassa 3.15, jossa on esitetty vakioteholämmitetyn koekohteessa 6 mitattuja lämpötiloja neljän vuorokauden ajalta.



Kuva 3.15 Tuulen vaikutus koekohteen 6 eri tarkastelupisteiden lämpötiloihin. Yläkuvaajassa on esitetty mitatut lämpötilat ja alakuvaajassa Ilmatieteen laitoksen Ähtäriin sääasemalla mitatut tuulen nopeudet.

Kuvasta nähdään, että tuulen voimistuminen maaliskuun 26. päivänä vaikutti lähinnä pohjoisikkunan lämpötilaan. Edes tarkastelujakson voimakkaimman tuulen aikaan (26.3.) muiden tarkastelupisteiden lämpötilat eivät juuri poikenneet ulkolämpötilan muuttumisen suhteen vastaavanlaisesta tilanteesta (24.3.), jolloin tuuli oli selvästi heikompaa. Toisaalta on huomattava, että 26. päivän voimakas tuuli oli lyhykestoinen. Ero lämpötilan muutosnopeudessa etelä- ja pohjoisikkunan välillä oli merkittävän suuri. Pohjoisikkunan nopeat lämpötilamuutokset voivat johtua esim. ikkunarakenteen ilmavuodoista.

On huomattava, että tutkimuksen puitteissa tehdyt tuulitarkastelut ovat hyvin suppeat ja rajalliset ja että mikäli tuulen vaikutusta haluttaisiin tutkia perusteellisemmin, tarvittaisiin enemmän tietoja mm. tarkasteltavan koekohteen ympäristöstä ja sen avoimuudesta eri ilmansuuntien suhteen. Johtopäätöksenä voidaan kuitenkin todeta, että lämmittämättömän tai kuivanapitolämmitetyn rakennuksen sisälämpötilaa voidaan arvioida tai mallintaa ulkolämpötilan perusteella. Rakenteiden laskentatarkasteluissa sisälämpötila määritettiin tällä tavoin ja mallinnettu lämpötila vastasi erittäin hyvin mitattua sisälämpötilaa (ks. kohta 4.2.5).

3.4 Mittaustulosten yhteenveto

3.4.1 Lämmittämättömät koekohteet

Lämmittämättömien koekohteiden mittaustuloksista tehtiin seuraavia havaintoja:

- Sisäilman lämpötila- ja kosteusolosuhteet eivät ole yleensä homehtumisen kannalta kriittisiä, mutta jossain tapauksissa ne voivat olla kriittisen tason tuntumassa.
- Sisäilman suhteellinen kosteus pysyy pääsääntöisesti alle 80 % RH, mutta ikkunapinnoilla suhteellinen kosteus voi olla ajoittain jopa 10–15 % RH korkeampi kuin sisäilmassa. Kosteuden tiivistymisen kannalta kriittisimmät kohdat ovat siis ikkunapinnat. Yleensä tiivistymistä ei kuitenkaan tapahdu asunnon ollessa käyttämättömänä.
- Sisäilman lämpötila- ja kosteusolosuhteet määräytyvät pääosin ulko-olosuhteiden mukaan siten, että sekä sisäilman lämpötila että sisäilman vesihöyrypitoisuus seuraavat ulkoilmassa tapahtuvia muutoksia lyhyellä, vain muutaman tunnin viiveellä. Olosuhteisiin vaikuttaa myös sisäilmaan yhteydessä olevat materiaalit.
- Sisäilman lämpötilan ja vesihöyrypitoisuuden muutosnopeuteen vaikuttavat merkittävästi vaipan lämmöneristyskyky sekä ilmanvaihto. Hyvä lämmöneristys ja ilmanvaihdon pienentäminen (käyttöajan ulkopuolella) parantavat asunnon sisäolosuhteita.
- Lukuun ottamatta kevättä ja ajankohtia, jolloin asunto on käytössä, sisäilman vesihöyrypitoisuus on pääsääntöisesti pienempi kuin ulkoilman vesihöyrypitoisuus. Keväällä tilanne voi olla päinvastainen. Ilmiöön vaikuttaa mm. sisäilmaan yhteydessä olevien hirsipintojen kosteudensitomiskyky.
- Talviaikainen käyttö kuivattaa mökkiä. Kuivumisvaikutus on sitä merkittävämpi, mitä enemmän asunnossa käydään ja mitä pidempään vierailut kestävät.

3.4.2 Kuivanapitolämmitetyt koekohteet

Kuivanapitolämmitettyjen koekohteiden mittaustuloksista tehtiin seuraavia havaintoja:

- Kuivanapitolämmitys antaa lämmittämättömänä pitämiseen nähden lisävarmuutta. Vaikutus voi olla hyvinkin merkittävä asunnossa, jossa sisäolosuhteet olisivat muuten homehtumisen kannalta kriittisen tason tuntumassa.
- Sisä- ja ulkoilman välille tavoitellun lämpötilaeron ollessa +3 °C sisäilman suhteellinen kosteus laskee karkeasti noin 10 % RH. Vaikutus on keväällä ja syksyllä suurempi kuin talvella. Tavoitelämpötilaeron kasvaessa suhteellinen kosteus pienenee vielä enemmän. Lämmityksellä on kuitenkin vähäisempi vaikutus ikkunapintojen olosuhteisiin kuin sisäilman olosuhteisiin.
- Siirryttäessä peruslämmöstä kuivanapitolämmitykseen vapaa-ajan asunnon sisäolosuhteet eivät muutu oleellisesti. Syys- ja kevätaikana kuivanapitolämmitys jopa parantaa tilannetta.
- Ulko-olosuhteet vaikuttavat sisäolosuhteisiin samoin kuin lämmittämättömissä vapaa-ajan asunnoissa. Lämmityksen johdosta sisälämpötila pysyy kuitenkin muutaman asteen korkeammalla kuin mitä se olisi ilman lämmitystä.
- Lämmittäminen ei vaikuta oleellisesti sisäilman vesihöyrypitoisuuteen, joten tilanne on sisä- ja ulkoilman välisen vesihöyrypitoisuuseron kannalta vastaavanlainen kuin lämmittämättömissä vapaa-ajan asunnoissa.

- Lämmittämiseen ei ole tarvetta ilmanpitävyydeltään tiiviissä mökissä, joka on lähes jatkuvassa asuinkäytössä. Tällaisessa mökissä sisäilman suhteellinen kosteus voi lämmittämisen seurauksena laskea jopa haitallisen alhaiseksi.
- Ilmanvaihdon rajoittamisella voidaan pienentää lämmitysenergiankulutusta sitä enemmän, mitä tiiviimpi on rakennuksen vaippa. Tiiviissä mökissä ilmanvaihdon sulkemisesta ei havaittu olevan haittaa edes kevätaikaan.

3.5 Kenttämittauksiin liittyviä epävarmuustekijöitä

Tuloksia tarkasteltaessa on otettava huomioon, että kenttämittaukset koskevat ainoastaan lisäeristämättömiä massiivihirsirakenteisia vapaa-ajan asuntoja. Tuloksia ei voida soveltaa suoraan esim. puurankarakenteisiin tai sisäpuolelta lisäeristettyihin hirsirakenteisiin vapaa-ajan asuntoihin, koska näissä tapauksissa seinien sisäpinnan lämmön- ja kosteudensitomiskyky voi poiketa merkittävästi lisäeristämättömistä hirsirakenteista.

Kenttämittausten aikana ongelmia havaittiin myös mittauksissa käytettyjen dataloggerien mittatarkkuudessa. Ulkona koekohteiden läheisyydessä sijainneilla dataloggereilla mitatut ulkoilmaolosuhteet poikkesivat suhteellisen kosteuden osalta Ilmatieteen laitoksen mittaamista ulkoilmaolosuhteista. Ulkotilassa dataloggereilla mitatut suhteelliset kosteudet olivat pääsääntöisesti Ilmatieteen laitoksen vastaaviin arvoihin nähden useita % RH korkeammat. Ulkoilman lämpötiloissa ei puolestaan ollut havaittavaa eroa Ilmatieteen laitoksen mittaustiedon ja kenttämittaustulosten välillä.

Korkeat suhteellisen kosteuden mittausravot ovat osaltaan selitettävissä loggerien mittauseriäällä: dataloggerit mittaavat suhteellista kosteutta jään yli arvona, kun taas Ilmatieteen laitoksen käyttämät laitteet mittaavat suhteellista kosteutta veden yli arvona. Jään yli mitatuissa arvoissa vesihöyryn kyllästyskosteuspitoisuus on alhaisempi lämpötilan ollessa pakkasen puolella, jolloin dataloggereilla saadut RH-arvot ovat suurempia. On myös otettava huomioon, että dataloggerien valmistajan ilmoittamaa toimintaylärajaa, eli yli 97 % RH:a, korkeampien arvojen luotettavuudesta ei voida olla täysin varmoja. Myös muiden tutkimusten yhteydessä näiden dataloggerien mittatarkkuuden on havaittu heikkenevän dataloggerin ollessa pitkään matalissa lämpötiloissa, esim. mittaamassa ulkoilmaolosuhteita. Toisaalta kosteuseroja ovat voineet aiheuttaa mittapisteiden väliset mikroilmastolliset erot, kuten kosteuserot metsän keskellä olevan mittauspisteeseen (dataloggeri) ja avoimessa maastossa olevan mittauspisteeseen (Ilmatieteen laitos) välillä. Lopulta mittaustulosten tarkastelussa ja analysoinnissa ulkoilmaolosuhteina käytettiin Ilmatieteen laitoksen mittaamia arvoja.

Pinnoilta saatuja mittaustuloksia tarkasteltaessa on myös muistettava, että anturien rakenteen vuoksi niitä ei voitu asentaa siten, että mittaasanturi olisi ollut kiinni tutkittavassa pinnassa. Mittaasanturin etäisyys tutkittavasta pinnasta oli noin 1,5 cm. Pinnan lähellä lämpötila- ja kosteusolosuhteet olisivat todennäköisesti eronneet sisäilman olosuhteista mitattuja arvoja enemmän erityisesti ikkunapinnoilla.

4 LASKENTATARKASTELUT

4.1 Laskentatarkastelujen tavoitteet ja WUFI Pro 4.2 -ohjelma

Jotta kuivanapitolämmityksen riskittömyydestä ja sen hyödyistä saataisiin parempi käsitys, myös vaipparakenteiden toimintaa tutkittiin. Tehtyjen laskentatarkastelun avulla pyrittiin mm. selvittämään, miten kerrokselliset vaipparakenteet toimivat lämmittämättömissä tai kuivanapitolämmityksessä vapaa-ajan asunnoissa ja millaisia vaatimuksia vaipparakenteet asettavat kuivanapitolämmityksellä tavoiteltavan lämpötilaeron suuruudelle.

Vapaa-ajan asuntojen kosteusolosuhteet ovat hyvin erilaiset jatkuvassa käytössä olevien asuinrakennusten kosteusolosuhteisiin nähden (ks. kohta 2.2.1). Erilaisista kosteusolosuhteista huolimatta molemmissa käytetään kuitenkin samantyyppisiä ja vastaavanlaisia rakenteita, vaikka asunnon kosteusolosuhteet vaikuttavat oleellisesti asunnon vaipparakenteiden toimintaan.

Kenttämittauksissa saatujen tulosten ohella myös Vinha (2007) on todennut, että vapaa-ajan asuntojen sisäilmassa voi olla kosteusvajetta (ks. kohta 3.3.3), jolloin diffuusion ja konvektion muodostama kosteusvirta suuntautuu ulkoa sisäänpäin. Kosteusvirran suunnalla on merkitystä erityisesti sellaisten rakenteiden toimivuudelle, jotka sisältävät vesihöyrynläpäisevyydeltään toisistaan poikkeavia rakennekerroksia. Kosteusvirran suuntautuessa ulkoa sisäänpäin tai vaihtelevasti molempiin suuntiin höyrynsulkukerroksella on kaksijakoinen vaikutus rakenteen kosteustekniseen toimivuuteen: höyrynsulkukerroksen tulisi toisaalta läpäistä riittävässä määrin ulkoa sisäänpäin suuntautuvaa diffuusiota estäen siten kosteuden kertymisen höyrynsulun ulkopintaan ja toisaalta höyrynsulun tulisi rajoittaa sisältä ulospäin suuntautuvaa kosteusdiffuusiota estäen sisäilman kosteuden siirtymistä rakenteen eristekerrokseen. Rakenteen ollessa lämmön- ja vesihöyrynläpäisevyydeltään homogeeninen, kuten esim. massiivihirsiseinä, kondenssiriskiä ei merkittävästi esiinny.

Laskentatarkastelut tehtiin WUFI Pro 4.2 -ohjelmalla ja tutkittavia rakenteita olivat tuulettuvat yläpohjarakenteet ja heikosti tuulettuvat ryömintätilaiset alapohjarakenteet. WUFI Pro 4.2 on Windows-pohjainen yksiulotteinen laskentaohjelma, joka soveltuu mm. erilaisten vaipparakenteiden toiminnan tarkastelemiseen muuttuvissa lämpö- ja kosteusolosuhteissa. Ohjelman avulla voidaan selvittää mm. rakenteeseen vapaasti sijoitettujen tarkastelupisteiden lämpö- ja kosteusolosuhteita sekä arvioida kosteuden kondensoitumisriskin suuruutta.

Lämmönsiirtymismuotojen osalta ohjelma ottaa huomioon johtumisen sekä veden kapillaarisen siirtymisen ja faasimuutosten myötä siirtyvän lämpöenergian. Laskennassa voidaan ottaa huomioon myös rakenteen ulkopintaan vaikuttavat lyhytaaltainen auringonsäteily ja yöaikainen pitkäaaltainen emissiivisäteily, mutta tutkimuksen laskentatarkasteluissa kummatkin suljettiin pois laskelmissa sovelletun suunnittelumenetelmän mukaisesti. Ohjelma ei ota huomioon esim. konvektion lämmön siirtymistä, mikä aiheuttaa osaltaan eroa todellisuuden ja saatujen laskentatulosten välille, erityisesti huokoisten materiaalien kohdalla. Huokoisia materiaaleja ovat esim. tarkastelluissa rakenteissa käytetyt mineraalivilla- ja puukuitulämmöneristeet.

Kosteuden siirtymisen osalta ohjelmassa on mukana vesihöyrysiirtyminen diffuusiolla (kaasudiffuusio) sekä nestemäisen veden siirtyminen kapillaarisesti ja pintadiffuusiolla. Kosteuden siirtymisessä ei siis oteta huomioon esim. konvektiota, painovoimaista siirtymistä tai paine-

erojen aiheuttamaa hydraulista siirtymistä. Ohjelmassa diffuusion virtauspotentiaalina ovat vesihöyryn osapaine-erot ja kapillaarisen siirtyminen potentiaalina erot suhteellisessa kosteudessa.

4.2 Laskentatarkastelujen suoritus

4.2.1 Tuulettettujen puu-ulkoseinärakenteiden suunnittelumenetelmä

Yläpohjarakenteilla tehdyissä tarkasteluissa sovellettiin Vinhan (2007) kehittämää tuulettettujen puu-ulkoseinärakenteiden suunnittelumenetelmää. Vinha on todennut, että mikäli puisessa ulkoseinässä on toimiva ja hyvin tuulettuva tuuletusrako, tuuletusvälin olosuhteina voidaan käyttää pohjoisseinällä ulkoilman lämpötila- ja kosteusolosuhteita ilman, että auringon säteilyä, saderasitusta, rakenteen ulkopinnan emissiivisäteilyn aiheuttamaa alijäähtymistä tai muita vastaavia tekijöitä otetaan huomioon. Tällä tavoin laskettaessa tulosten tulisi olla riittävän tarkkoja, koska tuuletusrako heikentää huomattavasti em. tekijöiden vaikutusta raon sisäpuolisen osan lämpötila- ja kosteusolosuhteisiin. Sateen, säteilyn yms. tekijöiden poissulkeminen selkeyttää osaltaan laskennassa käytettävän referenssivuoden valintaa, sillä vuoden valinta voidaan tehdä pelkäämättä lämpötilan ja suhteellisen kosteuden perusteella.

Menetelmän mukaan tarkasteluissa tulisi käyttää tarkastelukohteen lähialueelta mitattuja ulkoilmaolosuhteita ja valita niistä tarkasteluihin kaksi referenssivuotta, joista toinen on kriittinen kosteuden tiivistymisen kannalta ja toinen kriittinen homeen kasvun kannalta. Jotta vuodet olisivat toisiinsa nähden vertailukelpoisia, niiden tulisi alkaa heinäkuun 1. päivänä ja päättyä kesäkuun 30. päivänä. Referenssivuosi tulisi valita siten, että korkeintaan 10 % vuosista on referenssivuoteen nähden kriittisempiä. Olosuhteet saavat toisin sanoen olla keskimäärin kerran kymmenessä vuodessa valittua referenssivuotta kriittisempiä. Koska näin valittu referenssivuosi on keskimääräisiä olosuhteita huomattavasti kriittisempi ja koska olosuhteiden ajoittaiset ylitykset eivät yleensä aiheuta vakavia ongelmia rakenteen toimivuudelle, käytettäväksi referenssivuodeksi ei ole tarvetta valita kaikista kriittisintä vuotta.

Vinha (2007) on todennut suunnittelumenetelmänsä olevan sovellettavissa myös puurakenteisiin ylä- ja alapohjiin sillä edellytyksellä, että yläpohjan tuuletusraon tai alapohjan ryömintätilan olosuhteista ja niiden vastaavuudesta ulkoseinärakenteen tuuletusraon olosuhteisiin on tehty yksityiskohtaisempaa tutkimusta. Tässä tutkimuksessa menetelmää sovellettiin kuitenkin ilman että rakenteiden olosuhteita olisi selvitetty tarkemmin. Pääsyy tähän on se, ettei tutkimusresurssien puitteissa ollut mahdollisuutta tutkia ala- ja yläpohjarakenteiden todellisia olosuhteita.

4.2.2 Laskennan suoritus

Puu-ulkoseinärakenteiden suunnittelumenetelmän soveltaminen yläpohjarakenteisiin tarkoitti käytännössä, että tuuletusvälin olosuhteina käytettiin laskentaan valittuja ulkoilman olosuhteita ilman että auringonsäteilyä ja saderasitusta otettiin huomioon. Rakenteen ulkopinnan emissiivisäteilyä ei myöskään otettu huomioon. Todellisuudessa varsinkin auringonsäteily voi vaikuttaa oleellisesti yläpohjarakenteen toimivuuteen, mutta koska auringonsäteily oli suljettu pois, yläpohjarakenteiden tarkasteluissa oltiin varmalla puolella.

Tarkasteltujen ryömintätilaisten alapohjarakenteiden kohdalla ryömintätilan olosuhteet määräytyivät puolestaan valittujen ulkoilmaolosuhteiden perusteella eikä laskennassa otettu huomioon rakenteen ulkopinnan emissiivisäteilyä tai pinnalle tulevaa säteilyä.

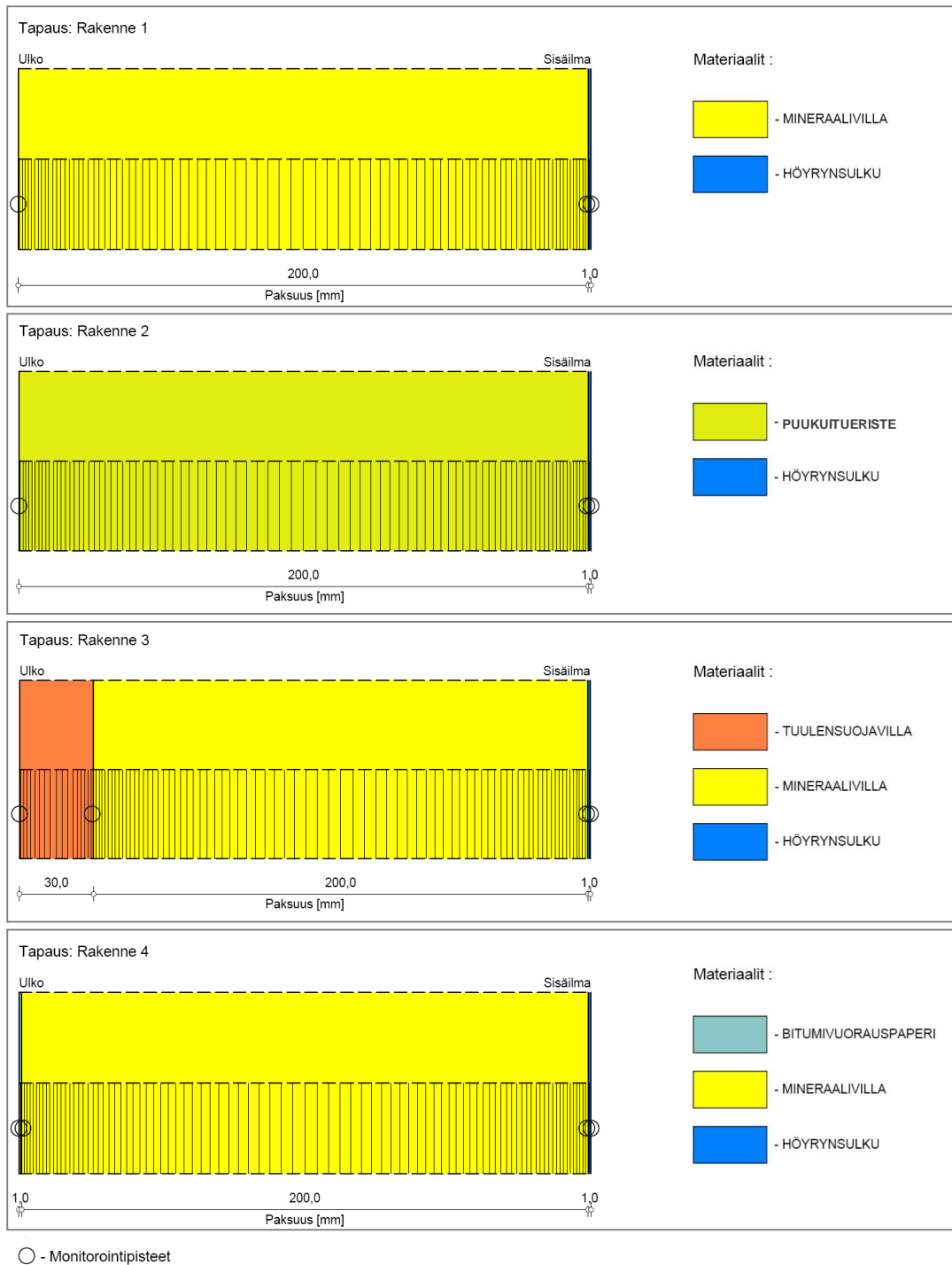
Kosteuden kapillaarista johtumista ei suljettu erikseen pois laskennasta, mutta koska pääosa käytetyistä materiaaleista ei ollut kapillaarisia, niin puukuitueristettä lukuun ottamatta materiaaleille ei syötetty kapillaarista johtumista (absorptiota ja kosteuden uudelleen jakautumista) koskevia materiaaliarvoja.

Laskennan kokonaiskesto oli 3 vuotta ja laskenta-aika-askeleena käytettiin 1 h, jolloin laskentatuloksina saatiin tarkastelupisteiden lämpötila- ja kosteusolosuhteet 1 h välein. Saatuja olosuhteita voitiin siten käyttää homeriskin arvioimiseen homemallin uusimman version avulla (Vinha et al. 2010), joka vaatii homeindeksin laskemiseksi tunnin välein syötetyt olosuhteet. Laskenta määritettiin alkavaksi heinäkuun ensimmäisestä päivästä alkaen.

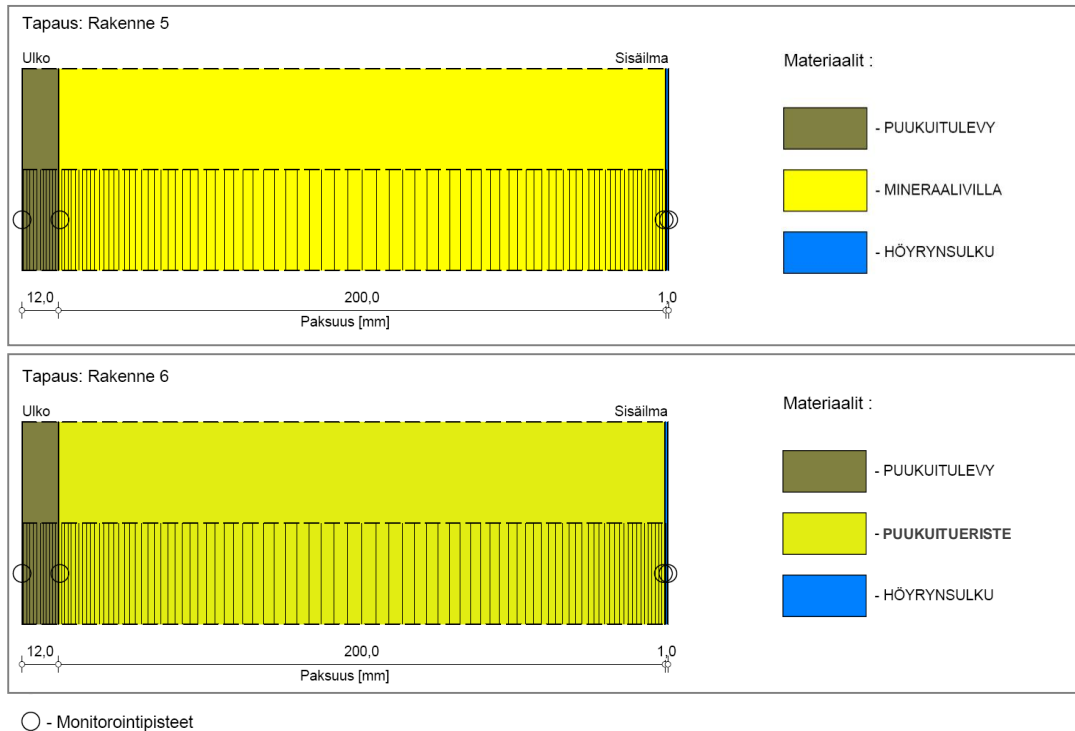
4.2.3 Rakenteet

Ohjelman yksiulotteisuuden vuoksi tarkasteltaviin rakenteisiin ei pystytty mallintamaan eristerakennosten puurankoja, mikä vaikutti osaltaan laskentatuloksiin. Yläpohjan osalta tehdyissä tarkasteluissa käytettiin neljää eri perusrakennetta ja alapohjan tarkasteluissa kahta eri perusrakennetta. Kussakin perusrakenteessa höyrynsulkukerroksena käytettiin neljää eri materiaalia, jotka olivat bitumipaperi, kaksi erilaista muovitiivistyspaperia sekä höyrynsulkumuovi. Tarkasteltavia rakenteita oli näin ollen yhteensä 24 kpl (16 yläpohja- ja 8 alapohjarakennetta). Kaikkien rakenteiden alkukosteus oli 65 % RH.

Ulkopuoleltaan tarkasteltavat yläpohjarakenteet rajoittuivat hyvin tuulettuvaan ilmarakoon ja alapohjarakenteet ryömintätilaan. Yläpohjarakenteissa sekä sisä- että ulkopinnan pintavastukset olivat $0,10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ja alapohjarakenteissa vastaavasti $0,17 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Sisä- ja ulkopinnan pintavastuksena käytettiin samaa arvoa rakenteen ulkopuolen ilmavälin vuoksi (RakMK C4 2002, kohta 5.2.8). Tarkastellut yläpohjarakenteet on esitetty kuvassa 4.1 ja alapohjarakenteet kuvassa 4.2.



Kuva 4.1 Tarkastellut yläpohjarakenteet (rakenteet 1-4) ja niiden materiaalikerrokset lueteltuna ulkoa sisäänpäin. Rakenteiden U-arvot olivat 0,169; 0,183; 0,145 ja 0,169 W/(m²·K). Huom. rakenteen 4 ulkopinnalla on 1 mm bitumivuorauispaperi.



Kuva 4.2 Tarkastellut alapohjarakenteet (rakenteet 5 ja 6) ja niiden materiaalikerrokset lueteltuna ulkoa sisäänpäin. Rakenteiden U-arvot olivat 0,159 ja 0,171 W/(m²·K).

Vaipparakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta lämmöneristeen sisä- ja ulkopinnat ovat yleensä kaikkein kriittisimpiä kohtia. Sen vuoksi tarkastelupiste (WUFI:ssa monitorointipiste, ks. kuvat 4.1 ja 4.2) sijoitettiin rakenteen sisä- ja ulkopinnan lisäksi eristekerroksessa mahdollisimman lähellä rakenteen höyrynsulkukerrosta. Tuulensuojallisissa rakenteissa 3, 4, 5 ja 6 oli lisäksi yksi ylimääräinen tarkastelupiste eristekerroksessa mahdollisimman lähellä tuulensuojaa. Jäljempänä esitetyt tulokset koskevat ainoastaan rakenteen sisäisiä tarkastelupisteitä, sillä rakenteen sisä- ja ulkopinnan olosuhteet olivat hyvin lähellä laskentaan syötettyjä sisä- ja ulkoilman olosuhteita, minkä vuoksi niitä ei ollut syytä tarkastella lähemmin.

4.2.4 Rakenteissa käytetyt materiaalit

Rakenteissa käytettyjen materiaalien materiaaliominaisuudet muokattiin vastaamaan TTY:n julkaisussa ”Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja kosteuden funktiona” (Vinha et al. 2005b) esitettyjä ja laajan tutkimuksen yhteydessä mitattuja materiaaliominaisuuksia. Laskennassa käytetyt materiaalit ja niiden materiaaliominaisuudet on esitetty taulukoissa 4.1, 4.2 ja 4.3.

Taulukko 4.1 Laskennassa käytetyt materiaalit ja materiaaliominaisuudet.

Materiaali	Tiheys [kg/m ³]	Huokoi- suus [m ³ /m ³]	Omin. Lämpö [J/(kg·K)]	Lämmönjohtavuus [10 ⁻³ W/(m·K)], f(RH)						diff.- vastus- ker. [-]
				0	33	65	86	97	100	
Mineraalivilla	22	0,98	850	35	35	35	35	35	600	1,2
Puukuitueriste	37	0,97	2000	38	38	38	39	42	600	1,3
Tuulensuojavilla	73	0,94	850	31	31	31	31	31	600	1,4
Bitumivuorauspaperi	940	0,60	1500	120	120	120	120	120	120	100
Puukuitulevy	270	0,85	1500	48	49	50	52	55	600	5,5
Bitumipaperi	740	0,60	1500	120	120	120	120	120	120	187
Muovitiivistyspaperi 1	760	0,30	2000	120	120	120	120	120	120	3880
Muovitiivistyspaperi 2	940	0,30	2000	120	120	120	120	120	120	9640
Höyrysulkumuovi	980	0,001	2300	400	400	400	400	400	400	89000

Taulukko 4.2 Materiaalien tasapainokosteudet suhteellisen kosteuden funktiona.

Materiaali	Tasapainokosteus [kg/m ³], f(RH)										
	0	33	55	65	75	80	83	86	93	97	100
Mineraalivilla	0,0	0,45	0,54	0,66	0,78	0,98	1,1	1,3	1,9	2,4	3,0
Puukuitueriste	0,0	1,9	3,1	4,0	4,8	6,1	6,8	8,6	12,9	15,2	430
Tuulensuojavilla	0,0	0,51	0,58	0,60	0,62	0,91	1,1	1,6	2,9	3,3	4,1
Puukuitulevy	0,0	12,4	19,6	22,4	25,2	33,6	38,7	45,9	62,7	71,3	207

Materiaaleille, joita ei ole esitetty taulukossa 4.2, ei annettu tasapainokosteuskäyrää. Näiden materiaalien kohdalla ohjelma käyttää tasapainokosteuden oletuskäyräänsä, koska ohjelma ei voi suorittaa laskentaa ilman että kullekin materiaalille on määritetty tasapainokosteuskäyrä. WUFI:n oletuskäyrässä materiaalin maksimikosteuspitoisuus riippuu materiaalin huokoisuudesta. Oletuskäyrän määrittämisestä löytyy lisätietoa ohjelmaan integroidun WUFI online Help:n kautta (kohdasta Reference: Material Data: Moisture Storage function).

Kapillaariominaisuudet syötettiin vain kahdelle materiaalille: puukuitueristeelle ja puukuitulevyille. Käytetyt kosteusdiffusiviteettiärvot veden siirtymiselle on esitetty taulukossa 4.3. Kosteuden uudelleenjakautumisen diffusiviteettiärvona käytettiin kymmenesosaa veden siirtymiselle annetusta kosteusdiffusiviteettiärvosta.

Taulukko 4.3 Materiaalien kapillaariominaisuudet.

Materiaali	Kosteusdiffusiviteetti veden siirtymiselle [m ² /s], f(RH)			
	0	80	97	100
Puukuitueriste	0	1,24*10 ⁻¹⁰	1,44*10 ⁻¹⁰	1,13*10 ⁻⁷
Puukuitulevy	0	4,36*10 ⁻¹²	1,53*10 ⁻¹¹	1,42*10 ⁻⁹

4.2.5 Ulko- ja sisäilmaolosuhteet

Laskennan referenssivuodeksi valittiin Kankaanpään 1.7.2007–30.6.2008 väliset olosuhteet, joiden havaittiin olevan homeen kasvun ja kondensoitumisriskin kannalta hyvin kriittiset (ks. kohta 3.2). Vuoden olosuhteet täyttivät suunnittelumenetelmän mukaan vaadittavan 10 %:n kriittisyystason sekä homeen kasvun että kosteuden kondensoitumisen osalta ja erityisesti homeen kasvun kannalta ne olivat selvästi vaadittavaan tasoon nähden kriittisemmät. Koska vuosi täytti molemmat sille asetetuista vaatimuksista, laskentaan ei siten tarvinnut valita kahta referenssivuotta. Kriittisillä laskentaolosuhteilla tehdyt tarkastelut ja laskennan lopputulokset ovat näin ollen varmalla puolella. Toisaalta olosuhteiden voidaan olettaa vastaavan jossain määrin myös ilmastomuutoksen seurauksena yleisemmin ilmeneviä olosuhteita.

Valittua referenssivuotta (Kankaanpää 2007–2008) käytettiin sellaisenaan ainoastaan yläpohjatarastelujen ulkoilmaolosuhteina. Tämän lisäksi referenssivuotta käytettiin sisäolosuhteiden ja alapohjatarastelujen ryömintätilan olosuhteiden määrittämisessä.

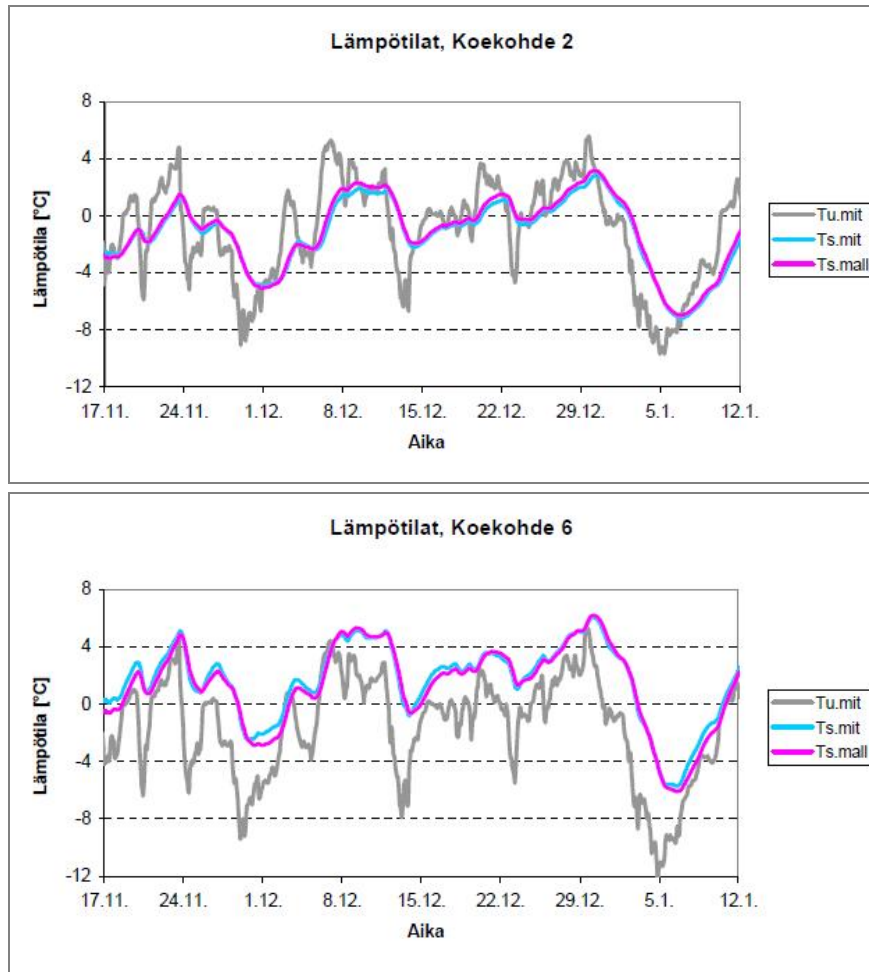
Laskennan sisäolosuhteet tuli siis määrittää siten, että ne vastaisivat valittuja ulko-olosuhteita. Sisäolosuhteiden osalta päädyttiin lopulta kaavan 4.1 mukaiseen ratkaisuun. Ulkolämpötilana käytettiin referenssivuoden (Kankaanpää 2007–2008) lämpötiloja ja mallinnetun sisälämpötilan lähtöarvona $T_{s, \text{mall}}(0)$ käytettiin ulkolämpötilan lähtöarvoa $T_{u, \text{mit}}(0)$.

$$T_{s, \text{mall}}(t) = T_{s, \text{mall}}(t-1) + p * (T_{u, \text{mit}}(t-1) - T_{s, \text{mall}}(t-1)) \quad (4.1)$$

Missä $T_{s, \text{mall}}(t)$ = mallinnettu sisälämpötila ajan hetkellä t (°C)
 t = tarkasteluhetki (h)
 p = muutoksen nopeutta kuvaava prosenttiluku ts. muutosprosentti (%)
 $T_{u, \text{mit}}(t)$ = mitattu ulkolämpötila ajan hetkellä t (°C)

Kaavan mukaan lämmittämättömän asunnon sisälämpötila seuraa ulkolämpötilaa siten, että sisällä yhden tunnin aikana tapahtuva muutos on ainoastaan muutaman prosentin ulkolämpötilan ja sisälämpötilan välisestä erotuksesta. Tehdyissä tarkasteluissa sisälämpötilan muutosprosenttina käytettiin 3 %, vaikka todellisuudessa muutosprosentti voi vaihdella esim. 1 ja 5 % välillä riippuen mm. rakennuksen ilmanvaihdosta sekä rakennuksen vaipan lämmöneristyksestä ja ilmanpitävyydestä. Muutosprosentin suuruus vaikuttaa oleellisesti sisäilman lämpötiloihin ja niiden kautta myös laskentatuloksiin, mikä tulee ottaa huomioon tarkastelujen lopputuloksissa.

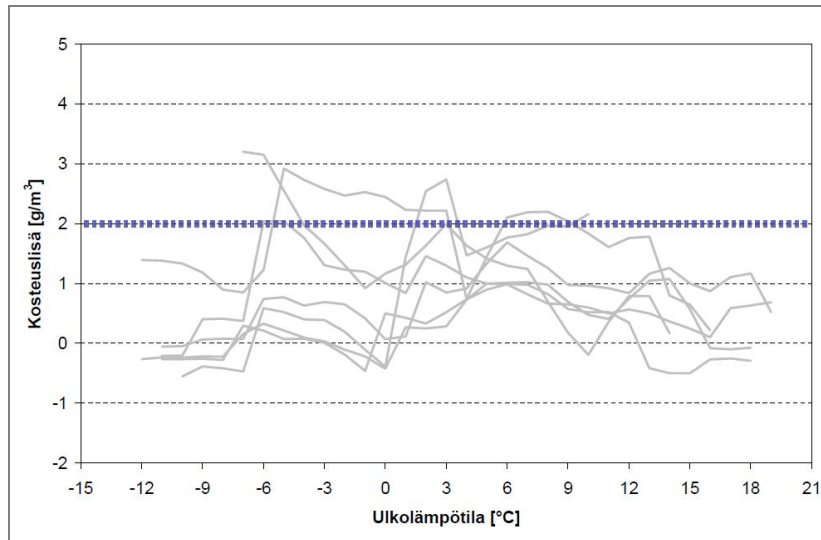
Kuivanapitolämmitetyn rakennuksen sisäolosuhteet määritettiin vastaavalla tavalla, mutta sillä erotuksella, että mallinnettu sisälämpötila oli 3, 4 tai 5 °C korkeampi kuin lämmittämättömässä rakennuksessa. Mallinnuksen kannalta tämä tarkoitti, että aluksi sisälämpötila laskettiin kaavan 4.1 avulla ja saatuihin arvoihin lisättiin lopuksi lämmityksen tavoitelämpötilaero. Kuvasta 4.3 nähdään, että em. tavoin mallinnetut sisälämpötilat vastasivat erittäin hyvin kenttämittauksissa mitattuja sisälämpötiloja.



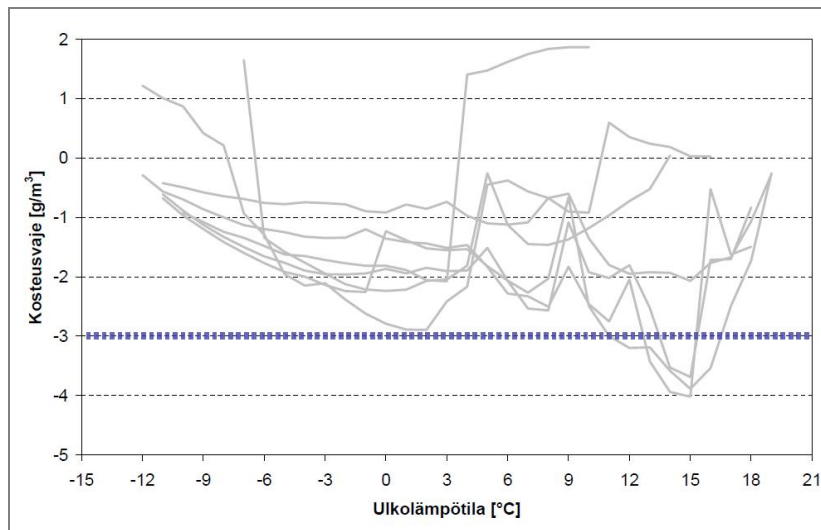
Kuva 4.3 Koekohteiden 2 ja 6 mitatut sisä- ja ulkolämpötilat ja mitatun ulkolämpötilan perusteella mallinnetut sisälämpötilat. Sisälämpötilan muutosnopeutena käytettiin 2 % lämmittämättömissä koekohteissa 2 ja 3 % vakioteholämmitettyssä koekohteessa 6.

Koska vapaa-ajan asuntojen sisäilmassa oli vaihtelevasti kosteusvajetta tai kosteuslisää (ks. kohta 3.3.3), laskentatarkasteluja tehtiin erikseen molemmissa tapauksissa. Sisäilman vesihöyrypitoisuuden laskemista varten tarvittiin kosteusvajeen ja kosteuslisän mitoitusarvot. Kosteusvajeen ja kosteuslisän mitoitusarvojen määrittämisessä sovellettiin TTY:n ja TKK:n yhteisprojektissa ”Kosteusvarma terve pientalo” käytettyä menetelmää (Vinha et al. 2005a s. 42), vaikkakaan menetelmän mukaista 90 % kriittisyystasoa ei määritetty koekohteiden vähäisen lukumäärän vuoksi.

Kosteusvajeen ja kosteuslisän mitoitusarvot määritettiin seuraavalla tavalla: aluksi laskettiin koekohteiden sisä- ja ulkoilman vesihöyrypitoisuuksien välisen erotuksen ja mitatun ulkolämpötilan juoksevat viikkokeskiarvot. Tämä tehtiin erikseen kunkin koekohteen osalta. Seuraavaksi vesihöyrypitoisuuserotuksen minimi (eli kosteusvajeen viikoittaiset maksimi-arvot) ja maksimi (eli kosteuslisän viikoittaiset maksimi-arvot) jaoteltiin ulkolämpötilan mukaan 1 °C tarkkuudella. Lopuksi koekohteiden minimi- ja maksimi-arvot lämpötilan funktiona esitettiin eri kuvaajissa ja kuvaajien perusteella määritettiin laskennassa käytetyt kosteusvajeen ja kosteuslisän mitoitusarvot. Kuvissa 4.4 ja 4.5 on esitetty määrittelyn viimeinen vaihe ja laskentaan valitut mitoitusarvot.



Kuva 4.4 Laskennassa käytetyn kosteuslisän määrittäminen. Kuvassa on esitetty harmaalla koekohteiden kosteuslisän (liukuvien viikkokeskiarvojen) maksimi-arvot ulkolämpötilan funktiona ja sinisellä pisteviivalla laskentaan valittu kosteuslisä 2 g/m^3 .



Kuva 4.5 Laskennassa käytetyn kosteusvajeen määrittäminen. Kuvassa on esitetty harmaalla koekohteiden kosteusvajeen (liukuvien viikkokeskiarvojen) maksimi-arvot ulkolämpötilan funktiona sekä sinisellä pisteviivalla laskentaan valittu kosteusvaje 3 g/m^3 .

Yläpohjatarkasteluissa sisäilman kosteusolosuhteet määritettiin erikseen kosteusvaje- ja kosteuslisätilanteelle. Näiden lisäksi tarkasteluja tehtiin sisäilman olosuhteilla, joissa sisäilman ja ulkoilman vesihöyrypitoisuudet olivat yhtä suuret, jolloin rakenteen yli ei ollut kosteuspotentiaalia. Alapohjatarkasteluissa sisäilman kosteusolosuhteet määräytyivät ryömintätilan kosteusolosuhteiden perusteella kohdan 4.2.6 mukaisesti.

Kosteusvajetilanteessa sisäilman vesihöyrypitoisuus määräytyi siten, että sisäilmassa oli ulkoilmaan nähden jatkuva 3 g/m^3 kosteusvaje lukuun ottamatta tilanteita, jolloin ulkoilman vesihöyrypitoisuus oli alle 3 g/m^3 eli jolloin sama kosteusvaje olisi ollut mahdoton. Kosteuslisätilanteessa sisäilmassa oli puolestaan jatkuva 2 g/m^3 kosteuslisä kuitenkin siten, ettei sisäilman suhteellinen kosteus kohonnut missään vaiheessa yli 100 % RH. Sisäilman vesihöyrypitoisuudet laskettiin (kosteusvaje- ja kosteuslisätilanteissa erikseen) ulkoilman vesihöyrypitoisuuden avulla

ja sisäilman vesihöyryn kyllästyskosteuspitoisuus mallinnetun sisälämpötilan perusteella. Lopuksi saatujen arvojen avulla määritettiin sisäilman suhteellinen kosteus. Suhteellisen kosteuden määrittämisessä otettiin huomioon, että suhteellinen kosteus pysyi välillä 0...100 % RH.

Ulkoilman vesihöyrypitoisuus ja sisäilman vesihöyryn kyllästyskosteuspitoisuudet ($\phi=1$) määritettiin standardin EN ISO 13788 (2001) mukaan kaavojen 4.2 ja 4.3 avulla. Ulkoilman vesihöyrypitoisuuden määrittämisessä lämpötilan ja suhteellisen kosteuden osalta käytettiin referenssivuoden (Kankaanpää 2007–2008) arvoja.

$$v = \phi * v_{sat} = \phi * \left(\frac{M_w}{R * (273,15 + T)} * p_{v.sat} \right) \quad (4.2)$$

$$p_{v.sat} = \begin{cases} 610,5 * e^{\frac{17,269 * T}{237,3 + T}} & \text{kun } T \geq 0 \text{ } ^\circ\text{C} \\ 610,5 * e^{\frac{21,875 * T}{265,5 + T}} & \text{kun } T < 0 \text{ } ^\circ\text{C} \end{cases} \quad (4.3)$$

Joissa v = ilman vesihöyrypitoisuus (g/m^3)
 ϕ = ilman suhteellinen kosteus (arvot välillä 0...1),
 v_{sat} = vesihöyryn kyllästyskosteuspitoisuus (g/m^3)
 M_w = veden moolimassa = 18,02 kg/kmol
 R = yleinen kaasuvakio = 8314,3 J/(kmol*K)
 T = ilman lämpötila ($^\circ\text{C}$)
 $p_{v.sat}$ = vesihöyryn osapaine kyllästyskosteuspitoisuudessa (Pa)

4.2.6 Ryömintätilan olosuhteet

Alapohjan laskentatarkasteluja varten tuli määrittää myös ryömintätilan olosuhteet. Ryömintätila valittiin heikosti tuulettuvaksi, jotta sen olosuhteet olisivat alapohjalle sekä homeen kasvun että kosteuden kondensoitumisen kannalta kriittiset (ks. kohta 2.2.5).

Ryömintätilan lämpötila määritettiin kaavojen 4.4 ja 4.5 avulla käyttäen vuoden lämpötilan keskiarvona $5 \text{ } ^\circ\text{C}$, vuosiamplitudina $4 \text{ } ^\circ\text{C}$ ja muutosprosenttina 20 %. Ryömintätilan alkulämpötilana $T_{ryöm.mall}(0)$ käytettiin kaavan 4.5 vuodenajan mukaista $T_{ryöm.sin}(0)$ lämpötilaa. Ulkolämpötilat olivat referenssivuoden (Kankaanpää 2007–2008) lämpötiloja. Kaavan 4.5 tarkasteluhetki määritettiin alkavaksi 1. heinäkuuta klo 0:00, jolloin ryömintätilan vuodenajan mukainen lämpötila sai maksimiarvonsa heinäkuun 24. päivä ja minimiarvonsa helmikuun 16. päivä. Esitettyihin laskentakaavoihin ja käytettyihin lähtöarvoihin päädyttiin arvioimalla alapohjan olosuhteita kenttämittaustietojen perusteella ja soveltamalla Kurnitskin (2000) ryömintätilaisten alapohjarakenteiden tutkimustuloksia.

Ryömintätilan lämpötila:

$$T_{ryöm.mall}(t) = T_{ryöm.sin}(t) + p * (T_{u.mit}(t-1) - T_{ryöm.mall}(t-1)) \quad (4.4)$$

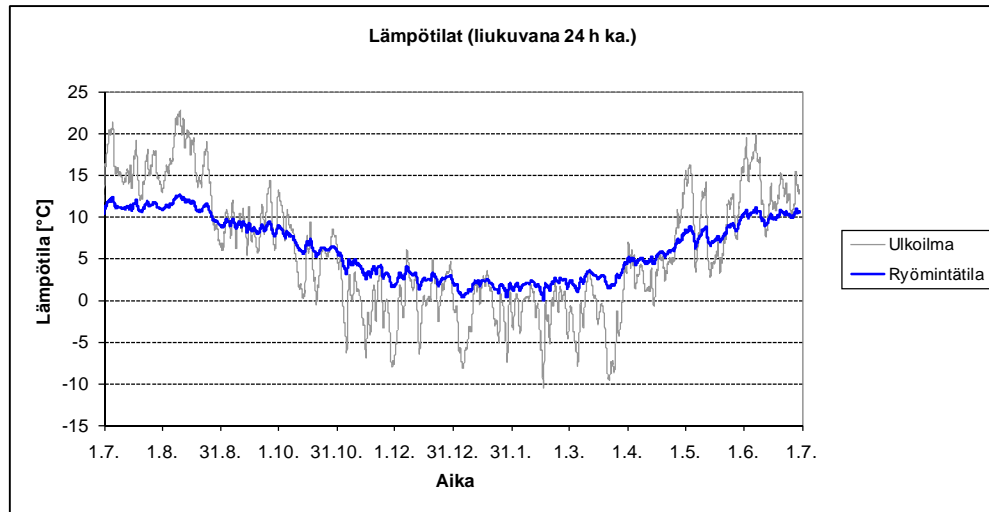
Missä $T_{ryöm.mall}(t)$ = mallinnettu ryömintätilan lämpötila ajan hetkellä t (°C)
 $T_{ryöm.sin}(t)$ = ryömintätilan vuodenajan mukainen lämpötila hetkellä t (°C)
 t = tarkasteluhetki (h)
 p = muutoksen nopeutta kuvaava prosenttiluku ts. muutosprosentti (%)
 $T_{u.mit}(t)$ = mitattu ulkolämpötila ajan hetkellä t (°C)

Ryömintätilan vuodenajan mukainen lämpötila:

$$T_{ryöm.sin}(t) = T_{ryöm.ka} + T_{ryöm.amp} * \sin\left(2\pi * \frac{(181 + t / 24) - 114}{365}\right) \quad (4.5)$$

Missä $T_{ryöm.sin}(t)$ = ryömintätilan vuodenajan mukainen lämpötila hetkellä t (°C)
 $T_{ryöm.ka}$ = ryömintätilan keskimääräinen lämpötila (°C)
 $T_{ryöm.amp}$ = ryömintätilan vuosiamplitudi (°C)
 t = tarkasteluhetki (h)

Kuvassa 4.6 on esitetty em. tavoin määritetty ryömintätilan lämpötila 24 tunnin liukuvana keskiarvona.



Kuva 4.6 Ulkoilman lämpötila ja mallinnettu ryömintätilan lämpötila 24 tunnin liukuvana keskiarvona.

Ryömintätilan kosteuslisä ulkoilmaan nähden arvioitiin TKK:lla suoritetun tutkimuksen ja siitä saatujen tulosten valossa (Kurnitski 2000), vaikka kyseinen tutkimus oli koskenut suurempia ja puurakenteisten alapohjien lisäksi myös betonirakenteisia alapohjia. Alapohjan ryömintätilassa oletettiin olevan ulkoilmaan nähden 3 g/m^3 kosteuslisä ja kun sisäilman kosteusvaje ulkoilmaan nähden oli 3 g/m^3 (ks. kohta 4.2.5), kokonaiskosteusvaje rakenteen yli oli 6 g/m^3 .

Ryömintätilan vesihöyryn kyllästyskosteuspitoisuudet laskettiin mallinnetun lämpötilan perusteella kaavoilla 4.2 ja 4.3. Ryömintätilan vesihöyrypitoisuus saatiin puolestaan lisäämällä kaa-

valla 4.2 laskettuun ulkoilman vesihöyrypitoisuuteen 3 g/m^3 . Ryömintätilan suhteellinen kosteus määritettiin lopulta saatujen vesihöyrypitoisuuksien perusteella siten, ettei suhteellisen kosteus ylittänyt missään tilanteessa 100 % RH:ta.

Alapohjatarkasteluissa sisäilman suhteellinen kosteus määritettiin seuraavalla tavalla: Sisäilman vesihöyrypitoisuus saatiin vähentämällä ryömintätilan vesihöyrypitoisuudesta 6 g/m^3 . Vesi-höyryn kyllästyskosteus määritettiin mallinnetun sisälämpötilan mukaan (erikseen lämmittämättömässä ja lämmitetyssä rakennuksessa). Lopuksi suhteellinen kosteus määritettiin edellisten arvojen perusteella siten, ettei se alittanut 0 % RH:ta.

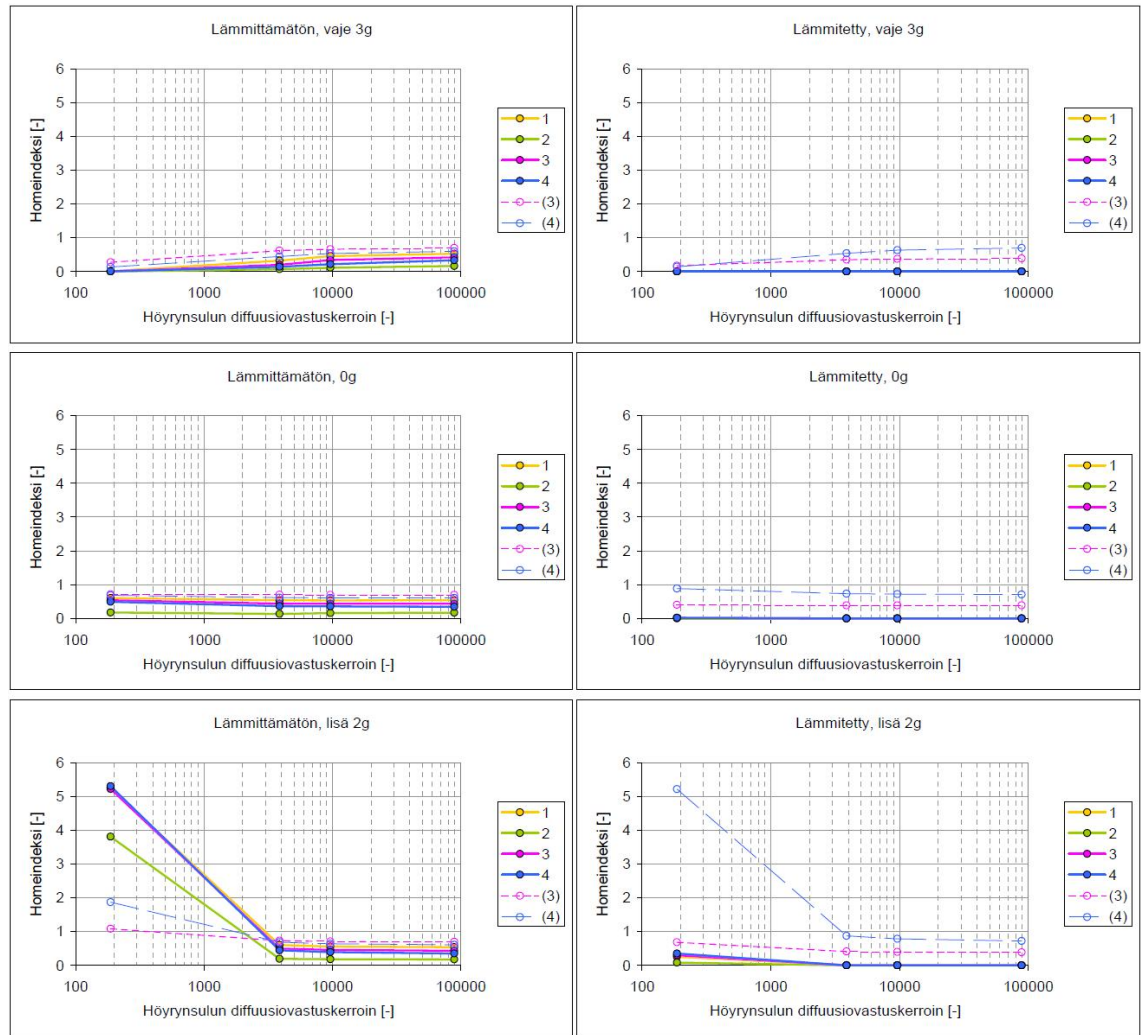
4.3 Laskentatulokset

4.3.1 Yläpohjarakenteet

WUFI -laskennan tuloksena saatiin kunkin rakenteen eri tarkastelupisteisten lämpö- ja kosteusolosuhteet tunnin välein. Olosuhteiden perusteella määritettiin homemallin (Vinha et al. 2010) mukaiset homeindeksit. Määritettyjä homeindeksejä käytettiin rakenteiden toimivuuden arvioimiseen sekä ylä- että alapohjarakenteiden kohdalla. Toimivuuskriteerinä käytettiin Vinhan (2007) esittämää periaatetta, jonka mukaan rakennetta voidaan pitää toimivana, jos homeindeksi ei ylitä arvoa 1 rakenteen sisäosassa (esim. höyrynsulun pinnoilla) ja jos homeindeksi ei ole missään kohden rakennetta ulkoilmaolosuhteilla laskettua homeindeksiä suurempi.

Referenssivuoden (Kankaanpää 2007–2008) homeindeksin maksimiarvo laskettuna uudemmalla homemallilla oli 5,0 (vrt. kohta 3.2; vanhemmalla mallilla 3,6). Koska laskentatarkastelut tehtiin uudemman homemallin mukaan, indeksin arvoa 5,0 käytetään ulkoilman homeindeksin vertailuarvona.

Kuvassa 4.7 on esitetty yläpohjarakenteiden laskentatarkastelujen tulokset. Kuvaajissa esitetyt pisteet ovat eri rakenteilla (numerotunnukset) ja vesihöyrynläpäisevyydeltään erilaisilla höyrynsuluilla (vaaka-akseli) saadut homeindeksien maksimiarvot kolmen vuoden laskenta-ajalta. Ilman sulkuja esitetyt numerot kuvaavat indeksin arvoja rakenteiden 1-4 höyrynsulun ulkopinnalla ja suluissa esitetyt numerot kuvaavat indeksin arvoja rakenteiden 3 ja 4 tuulen-suojan sisäpinnalla. Lämmitetyllä sisätilalla tehdyissä tarkasteluissa (kuvassa oikealla) sisälämpötila on ollut jatkuvasti $3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ korkeampi lämmittämättömään sisätilaan nähden (kuvassa vasemmalla).



Kuva 4.7 Yläpohjarakenteiden tulokset. Yläkuvaajissa esitetyt tulokset on laskettu 3 g/m^3 kosteusvajeella, keskikuvaajat 0 g/m^3 ja alakuvaajat 2 g/m^3 kosteuslisällä. Ilman sulkua esitetyt numerot viittaavat höyrinsulun ulkopinnalla ja suluissa esitetyt numerot tuulensuojan sisäpinnalla olevaan tarkastelupisteeseen.

Kuvasta 4.7 havaitaan, että tarkastellut yläpohjarakenteet (ks. kuva 4.1) ovat olleet pääosin toimivia. Kussakin rakenteessa tarkastelupisteiden homeindeksit ovat pysyneet yhden alapuolella lukuun ottamatta 2 g/m^3 kosteuslisätilannetta. Pääsyy alhaisiin homeindekseihin oli se, että tarkastelupisteiden lämpötilat olivat kohtalaisen matalat suhteellisten kosteuksien ollessa korkeita. 2 g/m^3 kosteuslisätilanteessa homeindeksit olivat korkeita sekä lämmittämättömän että lämmitetyn sisätilan osalta tehdyissä tarkasteluissa, mikäli höyrinsulun vesihöyrystävä vastus oli pieni.

Verrattaessa rakenteita 1 ja 2, puukuitueristetty rakenne 2 toimi mineraalivillaeristettyä rakennetta 1 paremmin kaikissa tapauksissa. Ero johtuu siitä, että laskennassa puukuitueristeen oletettiin olevan huomattavasti hygroskooppisempi, jolloin se kykeni sitomaan itseensä enemmän kosteutta. Puukuitueristeen sitoessa kosteutta rakenteen suhteellinen kosteus pysyi alhaisempana, mikä vaikutti homeindekseihin. Puukuitueristetty rakenne 2 toimi myös tuulensuojallisia rakenteita 3 ja 4 paremmin.

Rakenteiden 3 ja 4 osalta tulokset olivat hyvin samanlaiset. Rakenteessa 3 tuulensuojana oli tuulensuojavilla ja rakenteessa 4 tuulensuojakalvo. Lämmitetyn sisätilan osalta tehdyistä tarkasteluista voidaan kuitenkin havaita, että rakenteessa 3 tuulensuojan sisäpinnan homeindeksit pysyivät rakenteeseen 4 nähden matalampana. Ero johtuu tuulensuojavillan paremmasta lämmöneristyskyvystä, minkä vuoksi rakenteessa 3 tuulensuojan sisäpinnan lämpötila oli pysynyt korkeampana ja suhteellinen kosteus (korkeamman lämpötilan vuoksi) matalampana. Ero on kuitenkin hyvin pieni ja indeksit ovat molemmissa tapauksissa selvästi pienemmät kuin ulkoilmassa.

Kuvasta 4.7 havaitaan myös, että rakenteen 4 tuulensuojan sisäpinnan olosuhteet ovat lämmitetyssä rakennuksessa kriittisemmät kuin lämmittämättömässä, mikäli rakenteessa on käytetty hyvin läpäisevää höyrynsulkua. Tämä johtui siitä, että sisäilman kosteuslisä oli lämmitetyssä rakennuksessa suurempi kuin lämmittämättömässä, koska lämmittämättömässä rakennuksessa kyllästyskosteuspitoisuus rajoitti vesihöyrypitoisuuden nousua.

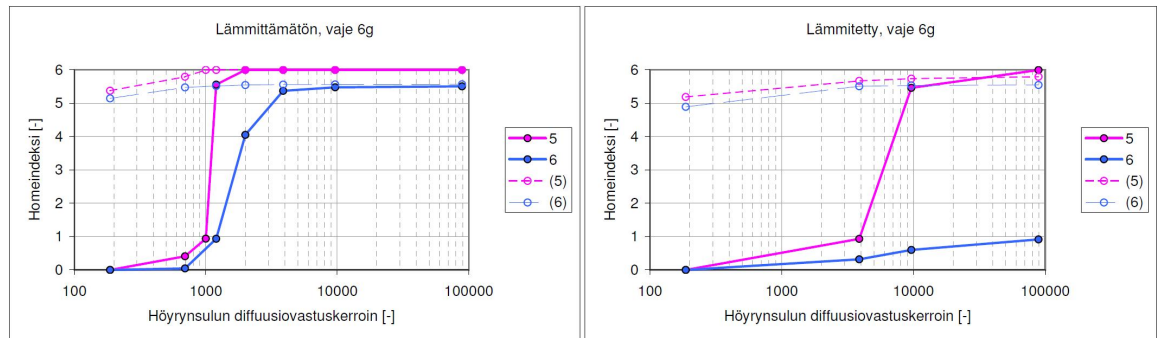
Tuloksia tarkasteltaessa on otettava kuitenkin huomioon, että 2 g/m^3 kosteuslisällä sisäilmaolosuhteet ovat olleet ylikriittisiä. Jotta sisäilmassa olisi jatkuvasti näin suuri kosteuslisä, tulisi kosteustuoton olla suurta. Tämä puolestaan tarkoittaisi, että asunto tulisi olla esim. jatkuvassa asuinkäytössä. Tällöin sisälämpötila olisi selvästi korkeampi ja suhteellinen kosteus matalampi. Laskentaolosuhteet ovat ylikriittiset ja epärealistiset myös sen vuoksi, että 2 g/m^3 kosteuslisällä sisäilman suhteellinen kosteus pysyi pääsääntöisesti 100 % RH:ssa, erityisesti lämmittämättömissä mökeissä. Tällaisissa sisäolosuhteissa homeindeksi nousisi hyvin nopeasti maksimiarvoon 6, jolloin ongelma ei olisikaan enää tutkittavassa rakenteessa vaan asunnon sisätilassa.

Ottamatta huomioon 2 g/m^3 kosteuslisällä saatuja (epärealistisia) tuloksia, tarkasteltujen yläpohjarakenteiden voidaan katsoa toimivan nykyisessä ilmastossa, vaikka asuntoa ei lämmitettäisi. Lämmitys, hygroskooppisen lämmöneristeen tai lämpöäeristävän tuulensuojan käyttö parantavat jossain määrin yläpohjarakenteiden kosteusteknistä toimintaa. Tulosten perusteella höyrynsulun vesihöyryläpäisevyydellä on melko vähäinen vaikutus yläpohjarakenteen toimintaan.

4.3.2 Alapohjarakenteet

Alapohjatarkasteluissa mukana oli vain kaksi rakennetta, jotka erosivat toisistaan ainoastaan käytetyn lämmöneristeen osalta. Rakenteessa 5 lämmöneristeenä oli mineraalivilla ja rakenteessa 6 puukuitueriste.

Kuvassa 4.8 on esitetty heikosti tuulettuvien ryömintätilaisten alapohjarakenteiden osalta saatuja tuloksia. Kuvaajissa esitetyt pisteet ovat eri rakenteilla (numerotunnukset) ja vesihöyrynläpäisevyydeltään erilaisilla höyrynsuluilla (vaaka-akseli) saadut homeindeksien maksimiarvot kolmen vuoden laskenta-ajalta. Ilman sulkua esitetyt numerot viittaavat tarkastelupisteeseen höyrynsulun ulkopinnalla ja suluissa esitetyt numerot viittaavat tarkastelupisteeseen tuulensuojan sisäpinnalla. Lämmitetyllä sisätilalla tehdyissä tarkasteluissa (kuvassa oikealla) sisälämpötila on ollut jatkuvasti $3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ korkeampi lämmittämättömään sisätilaan nähden (kuvassa vasemmalla).



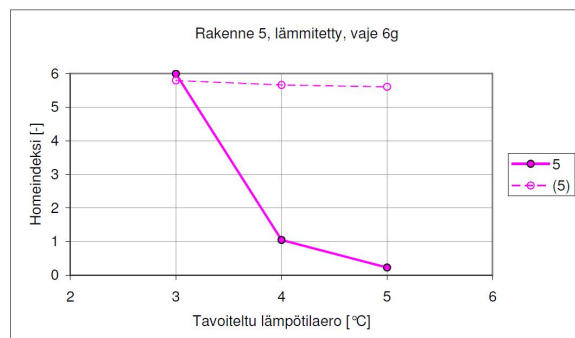
Kuva 4.8 Alapohjarakenteiden tulokset rakenteen yli olevalla 6 g/m^3 kosteusvajeella. Ilman sulkuja esitetyt numerot viittaavat höyrynsulun ulkopinnalla ja suluissa esitetyt numerot tuulensuojan sisäpinnalla olevaan tarkastelupisteeseen.

Vaikka tuulensuojan sisäpinnan homeindeksit olivat erittäin korkeat, niitä ei ole tarvetta ottaa huomioon rakenteen toimivuuden arvioinnissa. Näin sen vuoksi, että ryömintätilan homeindeksin saavutti nopeasti indeksin maksimiarvon 6,0 ja rakenteen ulko-olosuhteiden perusteella laskeutu homeindeksi oli näin ollen rakenteen sisäisten tarkastelupisteiden homeindekseihin nähden kriittisempi (tai yhtä kriittinen).

Kuvasta 4.8 havaitaan, että tarkastellut heikosti tuulettuvat ryömintätilaiset alapohjarakenteet (ks. kuva 4.2) toimivat huomattavasti heikommin kuin aiemmin tarkastellut yläpohjarakenteet. Tarkastellut alapohjarakenteet vaativat yleensä lämmitystä, ellei alapohjassa ole käytetty erittäin läpäisevää höyrynsulkumateriaalia.

Lämmöneristysmateriaalin hygroskooppisuus vaikuttaa osaltaan rakenteen toimintaan samoin kuin yläpohjan kohdalla. Kuvan 4.8 perusteella puukuitueristetty rakenne 6 toimii mineraalivillalieristettyä rakennetta 5 paremmin. Rakenteen 6 osalta lämmityksellä ylläpidettävä $3 \text{ }^\circ\text{C}$:n lämpötilaero on riittävä riippumatta käytetystä höyrynsulusta. Rakenteella 5 osalta $3 \text{ }^\circ\text{C}$:n lämpötilaero ei puolestaan ole riittävä, mikäli rakenteessa on tiivis höyrynsulku.

Kuvassa 4.9 on esitetty, kuinka rakenteen 5 homeindeksin maksimi höyrynsulun ulkopinnalla muuttuu tavoitelämpötilaa nostettaessa 4 tai $5 \text{ }^\circ\text{C}$:een. Kuvassa esitetyssä rakenteessa käytettiin erittäin tiivistä höyrynsulkumuovia, jonka diffuusiovastuskerroin oli $89\,000$.



Kuva 4.9 Homeindeksin maksimi höyrynsulkumuovin ulkopinnalla sisä- ja ulkoilman välisen lämpötilaeron ollessa 3 , 4 ja $5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Kuvasta havaitaan, että mikäli alapohjarakenteessa käytetään höyrynsulkumuovia, homeindeksin maksimiarvo laskee 4 °C lämpötilaerolla hyvin lähelle arvoa 1 ja 5 °C lämpötilaerolla lähelle arvoa 0. Sisälämpötilan nostamisella näyttäisi puolestaan olevan erittäin vähäinen vaikutus tuulensuojan sisäpinnan olosuhteisiin. Toisaalta ryömintätilan lämpötila- ja kosteusolosuhteiden oletettiin pysyvän vakiona sisälämpötilasta riippumatta, vaikka todellisuudessa sisälämpötilan nostaminen vaikuttaisi jossain määrin myös ryömintätilan olosuhteisiin.

Kuvan 4.9 perusteella voidaan todeta, mikäli heikosti tuulettuvassa ryömintätilaisessa alapohjassa on käytetty hyvin tiivistä höyrynsulkumateriaalia, sisä- ja ulkoilman välille tulisi asettaa 5 °C:n lämpötilaero.

4.4 Laskentatarkastelujen johtopäätökset

Laskentatuloksia tarkasteltaessa on otettava huomioon, että tarkastelut tehtiin ainoastaan tyyppilisimmille avohuokoisilla lämmöneristeillä eristetyille ylä- ja alapohjarakenteille. Tarkastelluista rakenteista puuttui lisäksi lämmöneristekerroksen puurangat ja rakenteet olivat ideaalisesti ja oikeaoppisesti toteutetut. Sekä puurangat että toteutusvirheet ja puutteet voivat vaikuttaa merkittävästi vaipparakenteiden kosteustekniseen toimintaan, minkä vuoksi on suositeltavaa, että vapaa-ajan asuntoa lämmitetään hieman, vaikka asunnolla käytettyjen rakenteiden perusteella lämmittäminen ei olisikaan välttämätöntä. Rakennusteknisiä virheitä, kuten kylmäsiltoja ja ilmavuotokohtia voidaan olettaa esiintyvän vapaa-ajan asunnoilla yleisesti sen perusteella, että mökkirakentajien keskuudessa on paljon rakennustiedon ja -taidon puutetta. Toisaalta ilmastomuutos tulee osaltaan heikentämään vaipparakenteiden kosteusteknistä toimintaa, minkä vuoksi asuntojen lämmittäminen tulee olemaan entistä tarpeellisempaa.

Laskentatarkastelujen perusteella vapaa-ajan asunnon alapohjarakenne määrää asunnon lämmitystarpeen suuruuden. Alapohjarakenteista ryömintätilainen heikosti tuulettuva rakenne on kosteusteknisen toimivuutensa kannalta kriittisin. Esimerkki tällaisesta rakenteesta on jatkuvan perusmuurin varassa olevan ryömintätilainen alapohja. Mikäli kyseisessä rakenteessa on käytetty läpäisevää höyrynsulkua (esim. bitumipaperia), sisätilat olisi suotavaa pitää vähintään 3 °C ulkotilaa lämpimämpänä. Jos höyrynsulku on tiivis (esim. muovikalvo tai muovitiivistyspaperi), lämpötilaeron tulisi olla 5 °C.

Alapohjan kohdalla rakenteen sisäpinnassa olevan höyrynsulun olisi suotavaa olla kohtalaisen hyvin vesihöyryä läpäisevä (esim. bitumipaperi), jotta ryömintätilasta sisäänpäin siirtyvä kosteus ei tiivistyisi höyrynsulun alapinnalle. Toisaalta läpäisevän höyrynsulun käyttö lisää kosteutta rakennuksen sisäilmassa, mutta tämän lisäkosteuden vaikutus ei luultavasti ole kovin merkittävä. Myös lattiamateriaali ja käytetty lattiapinnoite on otettava huomioon. Alapohjan puulattia kannattaa pinnoittaa vesihöyryä läpäisevällä aineella, sillä esim. perinteinen lakkaus saattaa muodostaa kosteuden tiivistymisen kannalta riskialttiin kerroksen.

Riippumatta alapohjassa käytettävän ilmansulun vesihöyrynvastuksesta on kuitenkin ensiarvoisen tärkeää, että ilmansulku on ilmatiivis, jotta ryömintätilassa mahdollisesti olevat homeitiöt eivät pääsisi kulkeutumaan ilmavirtausten mukana mökin sisälle. Sinällään tutkimus osoittaa myös sen, että kesämökkien ryömintätilaisissa alapohjissa voi olla hyvin herkästi homeen kasvulle otollisia olosuhteita. Tästä syystä alapohjien tuuletus pitäisi järjestää mahdollisimman

hyväksi pitämällä ryömintätila tyhjänä tavaroista. Lisäksi maapohja tulisi aina lämpöeristää kauttaaltaan, jotta maapohja ei jäädyttäisi niin paljon ryömintätilan ilmaa kesäaikana.

Tuulettuvien yläpohjarakenteiden kohdalla 3 °C lämmitys on riittävä riippumatta rakenteessa käytetystä höyrynsulkumateriaalista. Yläpohjassa käytetyn höyrynsulun ei tulisi kuitenkaan olla liian vesihöyryä läpäisevä varsinkaan silloin, jos asunnon käyttö on runsasta. Laskentatarkastelujen valossa hygroskooppisten lämmöneristeiden käyttö parantaa myös jossain määrin vaipparakenteiden toimintaa sekä yläpohjan että alapohjan kohdalla.

Yläpohjan laskentatulokset ovat osaltaan sovellettavissa myös joihinkin muihin rakenteisiin, joita ei tutkittu erikseen. Tarkasteltujen yläpohjarakenteiden ja hyvin tuulettuvien ryömintätilaisten alapohjarakenteiden osalta rakenteen ulko-olosuhteiden voidaan olettaa olevan hyvin samankaltaiset, ellei alapohjan ryömintätila ole jostain syystä erityisen kostea. Ryömintätila saattaa olla tavallista kosteampi, jos maapohja on todella kostea, jos ryömintätilan maanpinta on rakennusta ympäröivään maanpintaan nähden matalampi (jolloin pintavedet valuvat ryömintätilaan) tai jos ryömintätilan ilmanvaihtoa on heikennetty esim. varastoimalla ryömintätilaan polttopuita tai muuta tavaraa.

Yläpohjan osalta saatuja tuloksia voidaan soveltaa myös alapuolelta lämmöneristettyyn maanvaraiseen laattaan, sillä lämmöneristeen sisäpuoliset olosuhteet ovat tarkasteltuihin yläpohjarakenteisiin nähden hyvin samanlaiset. Näin ollen 3 °C lämpötilaeron voidaan katsoa riittävän myös hyvin tuulettuvan ryömintätilaisen (esim. pilariperusteisen) alapohjan ja alapuolelta lämmöneristetyyn maanvaraisen betonilaatan kohdalla.

Yläpohjatarkastelujen valossa 3 °C lämpötilaero on riittävä myös puurankarakenteisten ulkoseinien kohdalla. Toisaalta on muistettava, että laskennan sisäolosuhteet määritettiin massiivihirsirakenteisissa vapaa-ajan asunnoissa tehtyjen kenttämittausten perusteella ja että puurankarakenteisia asuntoja ei ollut tutkimuksessa mukana. Näin ollen ei voida olla varmoja, millaiset rankarakenteisten asuntojen sisäolosuhteet ovat massiivihirsirakenteisiin asuntoihin nähden, koska mm. rankarakenteisen vaipan parempi lämmöneristys ja ilmatiiviys vaikuttavat sisäilman olosuhteisiin.

On kuitenkin huomattava, että vapaa-ajan asunnoilla voi esiintyä myös rakenteita, jotka eivät ole toimivia, vaikka lämmitys olisi kuinka suuri tahansa. Eräs tällainen rakenne on maanvarainen laatta, jota ei ole lämpöeristetty alapuolelta ja jonka päälle on asennettu lämmöneristetty puulattia. Tällaisia rakenteita on käytetty varsinkin vanhemmissa mökeissä.

4.5 Laskentatuloksiin liittyvät epävarmuustekijät

Laskentatarkasteluihin liittyy useita laskentaohjelman toimintaa, laskennan määrittämiä ja tarkasteltavia rakenteita koskevia epävarmuustekijöitä. Laskentatarkasteluissa käytetty laskentaohjelma rajoittui rakenteiden yksiulotteiseen tarkasteluun, jolloin mm. rakenteissa olevia puurankoja ei kyetty ottamaan laskennassa huomioon. Puurankojen suuremman lämmönjohtavuuden vuoksi lämpötilat puurankojen läheisyydessä ovat ajoittain alhaisempia, jolloin suhteellinen kosteus on korkeampi ja kosteutta saattaa kondensoitua. Toinen merkittävä ohjelman toimintaan liittyvä tekijä on konvektion poissulkeminen laskennasta. Konvektion (rakenteen läpäisevän ja

rakenteen sisäisen konvektion) vaikutus rakenteen lämpötilajakaumaan voi olla hyvin merkittävä erityisesti huokoisten materiaalien (esim. mineraalivillan ja puukuitueristeen) kohdalla.

Laskentaan valitut ulkoilmaolosuhteet (referenssivuosi) olivat aiempien tilastointien valossa hyvin kriittisiä. Myös sisäolosuhteiden määrittämisessä käytetyt kosteuslisän ja kosteusvajeen mitoitusarvot olivat kriittisiä mm. sen vuoksi, ettei kosteusvajeen ja -lisän mitoitusarvojen määrittämisessä käytetty 90 % kriittisyystasoa koekohteiden pienen lukumäärän vuoksi. Mikäli mitoitusarvot haluttaisiin määrittää tarkemmin, tulisi koekohteita olla mukana huomattavasti enemmän. On myös huomattava, että sisäolosuhteiden mallintamisessa vierailuja ja niiden vaikutusta ei otettu huomioon esim. sulkemalla vierailujen aikaisia olosuhteita pois tarkasteluista. Koekohteiden käyttö ja siihen liittyvät asumisen kosteustuotto, lämmitys, tuuletus ja hirsipintojen kuivuminen ovat luultavasti vaikuttaneet merkittävästi ääriarvojen esiintymiseen ja sitä kautta mitoitusarvojen suuruuteen.

Hirsirakenteisissakin vapaa-ajan asunnoissa esiintyy useita, enemmän tai vähemmän tässä tarkasteltuihin rakenteisiin nähden erilaisia ala- ja yläpohjarakenteita. Lisäksi kaikkien tarkastelurakenteiden eristepaksuutena käytettiin 200 mm ja eristepaksuuden muuttuessa tulokset voivat olla erilaisia, vaikka rakenteet olisivatkin tutkittuihin rakenteisiin nähden muuten samanlaisia. Lämmöneristystä vähentämällä höyrynsulun ulkopinnan (ja koko rakenteen) olosuhteet lähenevät ulkoilmaolosuhteita, jolloin rakenteen toiminta heikkenee. Lämmöneristyksen vähentämisen voidaan katsoa vaikuttavan epäsuotuisasti myös asunnon sisäolosuhteisiin, koska sisälämpötilan muutoksista tulee nopeampia.

Yläpohjan osalta tehdyissä tarkasteluissa sovellettiin puurakenteisten ulkoseinien suunnittelumenetelmää, jonka mukaan tarkasteluissa ei ollut mukana auringonsäteilyä, saderasitusta ja emissiivisäteilyn aiheuttamaa rakenteen ulkopinnan alijäähtymistä. Todellisuudessa yläpohjarakenteen tuuletusraon toiminta sekä sen lämpö- ja kosteusolosuhteet ovat ulkoseinärakenteen tuuletusrakoon nähden erilaiset. Ero johtuu mm. yläpohjarakenteen heikommasta tuulettumisesta, mikä voi puolestaan nostaa ilmapölyn suhteellista kosteutta. Matalassa vaakasuuntaisessa ilmapölyssä lämpötilaerojen aiheuttama ilmankierto ei edistä ilmanvaihtumista yhtä tehokkaasti kuin ulkoseinärakenteen pystysuuntaisessa ilmaraossa. Toisaalta auringon säteily ja yöaikaisella vesikatteen pinnan alijäähtyminen vaikuttaa enemmän yläpohjan kuin seinärakenteen olosuhteisiin. Jossain tapauksissa tuuletusvälin ilman sisältämä kosteus voi myös tiivistyä katteen alapintaan ja valua eristekerrokseen. (Vinha 2007)

Alapohjan osalta tilanne on yleensä yläpohjaa kriittisempi. Maaperän vaikutuksesta johtuen ryömintätilan olosuhteet ovat kesäaikaan ulkoilmaan nähden huomattavasti kriittisempiä, mikä otettiin huomioon laskentaolosuhteiden määrittämisessä. Kenttämittaustiedon puuttuessa alapohjan olosuhteet jouduttiin kuitenkin määrittämään hyvin karkealla tasolla. Olosuhteet pyrittiin mallintamaan jopa hieman ylikriittisiksi, jotta tarkasteluissa oltaisiin varmalla puolella. Maan lämpö ja kosteus vaikuttavat ryömintätilan olosuhteisiin sitä enemmän, mitä vähäisempää on ryömintätilan tuulettuminen. Ryömintätilan olosuhteet riippuvat siis hyvin oleellisesti tuuletusjärjestelyistä, vaikka niitä ei otettu erikseen huomioon laskentaolosuhteita määritettäessä.

5 LÄMMITYSTEHON MÄÄRITYS

5.1 Lämmitystehon määrittämiseen käytettävän mallin lähtökohdat

Tutkimuksen yhteydessä oli tarkoitus luoda yksinkertaistettu malli, jota voitaisiin käyttää avuksi kuivanapitolämmityksen tehon määrittämisessä. Yksinkertaistuksen vuoksi mallissa otettiin huomioon ainoastaan vaipan johtumishäviöt, vuotoilman lämpöhäviöt ja rakennuksen mittasuhteiden vaikutus. Saadun mallin paikkaansa pitävyyttä pyrittiin arvioimaan vertaamalla mallin avulla saatuja lämmitystehoja koekohteissa mitattuihin ja Rakentamismääräyskokoelman D5:n mukaisesti määritettyihin lämmitystehoihin (ks. kohta 5.3).

Lämmitystehon määrittämisessä käytettävää mallia luonnosteltaessa sen havaittiin olevan samankaltainen riippumatta siitä, määritetäänkö teho asunnon pinta-alan vai tilavuuden perusteella. Molemmissa tapauksissa laskentaa varten tarvittiin asunnon pinta-ala, tilavuus sekä näiden suhde. Lämmitystehon määrittämisessä tarvittiin siis samat kertoimet, joilla otetaan huomioon asunnon mittasuhteet ja rakennusvaipan ominaisuudet. Lopullisessa mallissa lämmitystehon määrittäminen päädyttiin tekemään asunnon pinta-alan suhteen, koska se vaikutti yksinkertaisemmalta ja helpommin hahmotettavalta tavalta. Lisäksi havaittiin, että pinta-alan avulla määritettäessä, mallissa käytetyt kertoimet muuttuivat selvästi suoraviivaisemmin.

Lopullisessa mallissa päädyttiin käyttämään kahta kerrointa, joista toinen määritettiin asunnon huonekorkeuden mukaan ja toinen vaipan ominaisuuksien (U-arvon ja ilmanpitävyyden) mukaan. Kerroin-arvot haettiin yksinkertaistetun laskentaesimerkin avulla. Esimerkissä käytettiin rakennusta, jonka sisätila oli neliönmuotoinen. Rakennuksen ulkoseinien sisäpintojen rajaama sisäpinta-ala oli $6,0 \text{ m} \times 6,0 \text{ m}$ eli 36 m^2 , jota pidettiin jatkuvasti vakiona. Ala- ja yläpohjan sisäpintojen rajaama huonekorkeus sai eri arvoja 2,4 m ja 3,4 m väliltä.

Laskennassa rakennuksen vaipalle käytettiin yhtä (pinta-alalla painotettua) U-arvoa eikä näin ollen eri rakennusosia eroteltu toisistaan. Vaipan U-arvo vaihteli saaden eri arvoja $0,30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ja $0,80 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ väliltä. Vaipan ilmavuotoluku muuttui puolestaan $1,0 \text{ l/h}$:sta ja 30 l/h :aan. Laskentamuuttujat ja niille käytetyt arvot on esitetty taulukossa 5.1.

Taulukko 5.1 Laskentamuuttujat ja niiden saamat arvot.

Huonekorkeus [m]	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6
Vaipan U-arvo [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80		
Vaipan ilmavuotoluku [l/h]	1,0	2,0	5,0	10	15	20	25	30

Mallirakennuksen energiakulutus määritettiin rakentamismääräyskokoelman osan D5 (2007) rakennuksen energiakulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskennan mukaisesti laskemalla vaipan johtumishäviöt kaavojen 5.1 ja 5.2 avulla ja vuotoilman lämmitykseen tarvittava energia kaavojen 5.3, 5.4 ja 5.5 avulla. Kaavan 5.2 lopullinen muoto on saatu käyttämällä vaipan painotettua U-arvoa.

Vaipan johtumishäviöt:

$$Q_{joht} = \sum H_{joht} * \Delta T * \Delta t / 1000 \quad (5.1)$$

$$\sum H_{joht} = \sum_{i=1}^n (U_{rakennusosa.i} * A_{rakennusosa.i})$$

$$\Rightarrow \sum H_{joht} = U_{painotettu} * A_{vaipan_kokonaisala} \quad (5.2)$$

Joissa Q_{joht} = rakenteiden läpi johtuva lämpöenergia (kWh)
 $\sum H_{joht}$ = rakennusosien yhteenlaskettu ominaislämpöhäviö (W/K)
 ΔT = rakennuksen vaipan yli oleva lämpötilaero (°C)
 Δt = tarkasteluajanjakson pituus (h)
 1000 = kerroin, jolla suoritetaan laadunmuunnos kilowattitunneiksi
 U = rakennusosan lämmönläpäisykerroin (W/(m²·K))
 A = rakennusosan pinta-ala (m²)

Vuotoilmanvaihdon lämpöhäviöt:

$$Q_{vuotoilma} = H_{vuotoilma} * \Delta T * \Delta t / 1000 \quad (5.3)$$

$$H_{vuotoilma} = \rho_{ilma} * c_{p.ilma} * q_{v.vuotoilma} \quad (5.4)$$

$$q_{v.vuotoilma} = n_{vuotoilma} * V / 3600 = \frac{n_{50}}{25} * V / 3600 \quad (5.5)$$

Joissa $Q_{vuotoilma}$ = vuotoilman lämmityksen tarvitsema energia (kWh)
 $H_{vuotoilma}$ = vuotoilman ominaislämpöhäviö (W/K)
 ΔT = rakennuksen vaipan yli oleva lämpötilaero (°C)
 Δt = tarkasteluajanjakson pituus (h)
 1000 = kerroin, jolla suoritetaan laadunmuunnos kilowattitunneiksi
 ρ_{ilma} = ilman tiheys = 1,2 kg/m³
 $c_{p.ilma}$ = ilman ominaislämpökapasiteetti = 1000 J/(kg·K)
 $q_{v.vuotoilma}$ = vuotoilmavirta (m³/s)
 $n_{vuotoilma}$ = rakennuksen vuotoilmakerroin (1/h)
 V = rakennuksen ilmatilavuus
 3600 = kerroin jolla suoritetaan laadunmuunnos m³/h:sta m³/s:iin
 n_{50} = rakennuksen vaipan ilmapuotoluku 50 Pa:n paine-erolla (1/h)

Energiakulutustarkastelujen tarkasteluajanjakso oli yksi vuosi ja sisä- ja ulkoilman välisenä lämpötilaerona käytettiin 1 °C. Laskennan suoritus ja saadut tulokset on esitetty liitteessä 2. Tarkastelujen avulla selvitettiin lämmitystehon määrittämisessä tarvittavat kerroin-arvot ja lämmitystehon oletusarvo. Lämmitystehon oletusarvon valitsemisessa käytettiin apuna koekohteissa mitattuja energiakulutuksia.

5.2 Lopullinen malli

Lämmitystehon laskentamalli muodostui lopulta alla esitettyyn muotoonsa. Ottaen huomioon rakennuksen mittasuhteet ja rakennusvaipan ominaisuudet lämmitysteho voidaan määrittää kaavan 5.6 mukaisesti

$$P = (k_1 * k_2 * p_0) * A * \Delta T \quad (5.6)$$

Missä k_1 = keskimääräisen huonekorkeuden perusteella määräytyvä kerroin
 k_2 = ilmavuotoluvun ja vaipan U-arvon perusteella määräytyvä kerroin
 p_0 = lämmitystehon oletusarvo = 3,0 W/(m²·K)
 A = ulkoseinien sisäpintojen rajaama asunnon pohjapinta-ala (m²)
 ΔT = sisä- ja ulkoilman välille tavoiteltava lämpötilaero (°C)

Mallissa kertoimen k_1 määrittämisessä tarvittava asunnon keskimääräinen huonekorkeus lasketaan kaavan 5.7 avulla. Ilmatilavuus määritetään vaipan sisäpintojen mukaan siten, että tilavuuteen sisältyy asunnon väliseinät, (RakMK D5:sta poiketen myös) asunnon välipohjat ja yläpohjan sisäpinnan alapuolelle jäävät osuudet horneista. Asunnon pohjapinta-ala käsittää asunnon pohjakerroksen (tai pinta-alaltaan suurimman kerroksen) ulkoseinien sisäpintojen rajaaman pinta-alan. Pohjapinta-alaan sisältyy myös asunnon väliseinät ja hormit.

$$h_{ka} = \frac{V}{A} \quad (5.7)$$

Missä V = rakennuksen vaipan sisäpintojen rajaama ilmatilavuus (m³)
 A = ulkoseinien sisäpintojen rajaama asunnon pohjapinta-ala (m²)

Kertoimet k_1 ja k_2 valitaan taulukoista 5.2 ja 5.3. Mikäli lähtöarvot eivät vastaa taulukossa esitettyjä arvoja, väliarvot voidaan interpoloida. Kertoimen k_2 määrittämisessä tarvitaan mitattua ilmavuotolukua ja rakennusvaipan yli laskettua pinta-alapainotettua U-arvoa. Mikäli asunnon ilmavuotolukua ei ole mitattu, k_2 kertoimena voidaan käyttää 30 1/h ilmavuotolukua vastaavia arvoja. Tutkimuksessa suoritettujen kenttämittausten perusteella n_{50} luku voi olla hirsirakenteissa mökeissä usein jopa 30 1/h (ks. kohta 3.1.2). Ilmavuotoluku on tietenkin sitä parempi, mitä enemmän vaipan ilmatiiviyyteen on kiinnitetty huomiota rakentamisen yhteydessä.

Taulukko 5.2 Huonekorkeuden mukaan määräytyvä kerroin k_1 .

Huonekorkeus [m]	≤ 2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4
Kerroin k_1 [-]	0,95	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25

Huom. Huonekorkeuden ollessa yli 3,4 m, kerroin kasvaa 0,05:lla kutakin 0,2 m:n korotusta kohden. Esimerkiksi 3,8 m huonekorkeudella kerroin k_1 on $1,25 + 2 * 0,05$ eli 1,35.

Taulukko 5.3 Ilmavuotoluvun ja vaipan U-arvon perusteella määräytyvä kerroin k_2 .

Vaipan U-arvo [W/(m ² ·K)]	Ilmavuotoluku n_{50} [1/h]							
	≤ 1	2	5	10	15	20	25	≥ 30
≤ 0,30	0,30	0,31	0,34	0,38	0,43	0,47	0,52	0,55
0,40	0,39	0,40	0,43	0,47	0,52	0,56	0,61	0,64
0,50	0,48	0,49	0,52	0,56	0,61	0,65	0,70	0,73
0,60	0,57	0,58	0,61	0,65	0,70	0,74	0,79	0,82
0,70	0,66	0,67	0,70	0,74	0,79	0,83	0,88	0,91
0,80	0,75	0,76	0,79	0,83	0,88	0,92	0,97	1,00

Jotta mallin avulla ja mitatun ilmavuotoluvun perusteella määritetty lämmitysteho olisi riittävä, (erityisesti tiiviiden asuntojen kohdalla) asunnon ilmanvaihto tulisi pitää suljettuna aina, kun kuivanapitolämmitetty asunto on käyttämättömänä. Ilmanvaihdon sulkeminen tarkoittaa käytännössä mökin ilmanvaihdon, hormien luukkujen sekä poistoilma- ja korvausilmakanavien yms. sulkemista.

Esimerkki: Vapaa-ajan asunnolla tarvittavan lämmitystehon määrittäminen, kun ulkoseinien sisäpintojen rajaama lattiapinta-ala on 45 m² ja kun kuivanapitolämmityksellä ylläpidetään ulkoilmaan nähden 5 °C:n lämpötilaeroa. Kesämökin keskimääräinen huonekorkeus on 2,65 m, ilmavuotoluku n_{50} 10 1/h ja vaipan painotettu U-arvo 0,56 W/(m²·°C).

Määritetään kertoimet k_1 ja k_2 taulukoiden 5.2 ja 5.3 avulla.

$$k_1 = 1,05 + \frac{2,65 - 2,6}{2,8 - 2,6} * (1,10 - 1,05) = 1,063$$

$$k_2 = 0,56 + \frac{0,56 - 0,50}{0,60 - 0,50} * (0,65 - 0,56) = 0,614$$

Lasketaan 5 °C:n ylläpitämiseen tarvittava lämmitysteho kaavalla 5.6.

$$P = (1,063 * 0,614 * (3,0 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)})) * 5 \text{ °C} * 45 \text{ m}^2 = 441 \text{ W}$$

Mikäli ilmavuotolukua ei olisi mitattu, kerroin k_2 olisi 0,783 ($n_{50} = 30$ 1/h) ja lämmitysteho 562 W, joka on noin 27 % suurempi kuin mitatun ilmavuotoluvun perusteella laskettu tehontarve.

5.3 Mallin mukaisen lämmitystehon vertailu

5.3.1 Vertailu koekohteissa mitattuihin lämmitystehoihin

Kenttämittausten toisena talvena kaikissa koekohteissa kokeiltiin vakioitehoista kuivanapitolämmitystä ja seurattiin lämmitysenergiankulutusta. Energiankulutuksen seuranta tapahtui käytännössä siten, että vapaa-ajan asuntojen omistajat kirjasivat mökin sähkömittarin lukemat aina asunnolle saavuttaessa ja sieltä lähettäessä. Lukemien perusteella määritettiin lämmityssähkönkulutus niiltä ajanjaksoilta, jolloin asunto ei ollut käytössä.

Mallissa käytettävä lämmityksen oletusteho määritettiin koekohteissa mitattujen energiankulutuksien avulla. Oletustehoksi valittiin $3,0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, koska tällä arvolla mallin avulla määritetty lämmitysteho oli hyvin lähellä mitattua lämmitystehoa neljän koekohteen osalta (koekohteet 2, 4, 5 ja 6). Kahdessa koekohteessa (koekohteet 3 ja 7) laskennallinen sähkönkulutus oli mitattuun kulutukseen nähden selvästi suurempi. Koekohteessa 3 laskennallinen lämmitysteho oli n. 32 % suurempi kuin mitattu. Pääsyy näin suureen eroon lieenee se, että asunto oli lähes jatkuvassa asuinkäytössä. Rungas käyttö vaikutti merkittävästi asunnon lämpötila- ja kosteusolosuhteisiin myös aikoina, jolloin asunto oli käyttämättömänä ja sen vuoksi lämmityksellä ylläpidetty lämpötilaero on mahdollisesti arvioitu liian suureksi. Oletustehon määrittäminen sekä mitattujen ja mallin avulla määritettyjen lämmitystehojen välinen vertailu on esitetty liitteessä 2.

Koekohteessa 7 laskennallinen lämmitysteho oli noin 24 % suurempi kuin mitattu teho. Liian suureen laskennalliseen tehoon voi olla useita syitä. Yksi syy, joka saattoi vaikuttaa muihin koekohteisiin nähden selvästi pienempään energiakulutukseen, on se että koekohteiden ollessa tiivein ja että sen ilmanvaihtoa pidettiin suljettuna aikoina, jolloin asunto ei ollut käytössä (ks. kohta 3.1.2). Myös muiden koekohteiden osalta on huomattavaa, että mallin mukaan eri koekohteille lasketuissa lämmitystehoissa on käytetty mitattuja ilmapuotolukuja, vaikka kenttämittausten aikana useiden koekohteiden ilmanvaihtoreitit ovat olleet joko kokonaan tai ainakin osittain avoinna.

Toisaalta lämmitystehon määrittämisessä käytettävästä mallissa auringonsäteilyä ja tuulta ei oteta huomioon, mutta todellisuudessa ne ovat vaikuttaneet enemmän tai vähemmän eri koekohteissa kuivanapitolämmityksellä aikaansaadun sisä- ja ulkoilman välisen lämpötilaeron suuruuteen.

5.3.2 Vertailu rakentamismääräyskokoelman D5 mukaisiin lämmitystehoihin

Mallin avulla laskettua lämmitystehoa verrattiin myös Rakentamismääräyskokoelman osan D5 (2007) mukaan laskettuun lämmitystehoon. D5:n mukaiset lämmitystehot olivat jonkin verran suurempia kuin tutkimuksessa esitetyllä mallilla saadut tehot. Jotta mallilla määritetty lämmitysteho vastaisi suuruudeltaan D5:n mukaista tehoa, tulisi lämmitystehon oletusarvon olla $3,0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ sijasta taulukossa 5.4 esitettyjen arvojen mukaisia. Kuten taulukosta havaitaan, RakMK D5:n mukainen oletusteho riippui oleellisesti asunnon pinta-alasta.

Taulukko 5.4 Lämmitystehon oletusarvot siten, että mallilla laskettu energiakulutus vastaa RakMK D5:n mukaan määritettyä energiakulutusta

Asunnon pohjan muoto [m^2]	4,0 * 4,0	4,0 * 6,0	6,0 * 6,0	6,0 * 8,0	8,0 * 8,0	8,0 * 10,0
Oletusarvo [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]	4,5	4,1	3,7	3,5	3,4	3,2

Taulukon perusteella voidaan päätellä, että RakMK D5:n mukainen lämmitysteho on esitetyn mallin mukaiseen tehoon ($3,0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$) nähden 7...50 % suurempi. Ero on sitä suurempi, mitä pienempi on asunnon pohjapinta-ala. Taulukon perusteella malli saattaisi kaivata joko pinta-alariippuvaista lisäkerrointa tai kertoimen k_1 muokkaamista siten, että se ottaisi huomioon täsmällisemmin asunnon pinta-alan suuruuden.

RakMK D5:n ja esitetyn mallin avulla määritettyjen lämmitystehojen välisiin eroihin vaikuttavat useat tekijät. Eräs merkittävimmistä tekijöistä lieenee vuotoilmanvaihto ja sen erot laskennan ja todellisuuden välillä. Vuotoilmanvaihdon kohdalla D5 olettaa, että rakennuksen vuotoilman-

vaihtokerroin on yksi 25:s osa vaipan ilmanpitävyyttä kuvaavasta n_{50} -luvusta. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että n_{50} -luvun ollessa 25 1/h, asunnon sisäilma vaihtuu vuotoilmanvaihdon kautta kerran tunnissa. Tämä lienee epärealistista varsinkin vapaa-ajan asunnoissa, joissa lämpötilaero ja sen aiheuttama paine-ero rakennuksen vaipan yli ovat melko pieniä jatkuvassa käytössä oleviin asuinrakennuksiin nähden. Energiakulutuskaskelmissa ei myöskään otettu huomioon auringonsäteilyn vaikutusta, joka todellisuudessa vähentää asunnon lämmitystarvetta. Toisaalta myös tuuli, joka voi puolestaan lisätä lämmitystarvetta, on jätetty tarkastelujen ulkopuolelle.

Rakennuksen pinta-alan vaikutusta selvitettiin erillisissä laskentatarkasteluissa, joissa muutettiin rakennuksen pinta-alaa ja tarkasteltiin muutoksen vaikutusta mallin kerroin-arvoihin. Tarkasteluissa havaittiin, että pääsääntöisesti kerrointen k_1 ja k_2 arvot kasvoivat asunnon pinta-alan pienentyessä ja pienenevät asunnon pinta-alan kasvaessa. Koska kerroin-arvot määritettiin mallirakennuksen perusteella, em. havainto tarkoittaa, että mallirakennusta eli pohjapinta-alaltaan 36 m² pienempien asuntojen kohdalla malli saattaa antaa hieman liian pienen lämmitystehon ja 36 m² suurempien asuntojen kohdalla malli saattaa antaa hieman liian suuren lämmitystehon. Ero lopullisessa lämmitystehossa ei ole luultavasti kuitenkaan 10 % suurempi (16–100 m² asunnoissa). Toisaalta on otettava myös huomioon, että mallissa käytetty oletusteho valittiin mallirakennusta koskevien laskelmien perusteella ja mikäli määrittämisessä olisi käytetty pinta-alaltaan erilaista rakennusta, oletustehon valinta olisi osaltaan kompensoinut eroa.

Tarkastelun perusteella voidaan kuitenkin päätellä, että 36 m² suurempien asuntojen kohdalla mallin avulla määritetty lämmitysteho on ns. varmalla puolella. Päätelmää tukevat myös taulukossa 5.4 esitetyt tulokset, joiden mukaan mökin pinta-alan suurentuessa mallin avulla määritetty lämmitysteho lähenee RakMK D5:n mukaan määritettyä lämmitystehoa.

5.4 Mallin epävarmuustekijät ja jatkokehittäminen

Mallin soveltamisessa on otettava myös huomioon, että mallin luomiseen, koekohteiden ominaisuuksiin ja mallissa käytettyihin kerroin- ja oletusarvoihin liittyy useita epävarmuustekijöitä. Mallin kertoimien ja lämmitystehon oletusarvon määrittämisessä jouduttiin tekemään yksinkertaisuuksia mm. käytettäessä laskennassa pohjaltaan 36 m² rakennusta. Myös koekohteiden vaipan painotetun U-arvon ja lämmityksen vuoksi toteutuneen lämpötilaeron määrittämisessä esiintyi useita epävarmuus- ja virhetekijöitä.

Tuuli on yksi tekijä, joka voi vaikuttaa mallilla lasketun ja mitatun energiakulutuksen välisiin eroihin. Tuulella voi olla ympäristöstä ja kohteen sijainnista riippuen merkittävä vaikutus lämmitysenergian kulutukseen. Vaikka aiemmin todettiin, ettei tuulen havaittu vaikuttavan merkittävästi tutkittujen koekohteiden olosuhteisiin (ks. kohta 3.3.7), on otettava huomioon, että mittauskohteita oli mukana melko vähän eikä yksikään näistä kohteista sijainnut tuulisella alueella (esim. rannikolla) tai maaston suhteen kovin avoimella paikalla.

Mallin mukaan koekohteille lasketuissa lämmitystehoissa käytettiin lisäksi mitattuja ilmapuotolukuja, vaikka kenttämittausten ajan usean koekohteen ilmanvaihtoreitit olivat joko kokonaan tai ainakin osittain avoinna. Tämä on osaltaan vaikuttanut ainakin lämmityksen oletustehon määrittämiseen. Koska koekohteiden ilmanvaihtoa ei juuri kontrolloitu, ilmanvaihdon ja ilmanvaihtoreittien sulkemisen merkitys jäi jossain määrin epäselväksi. Tässä yhteydessä on kuitenkin huomattava, että esitetyssä mallissa rakennuksen ilmanvaihdon ja ilmanvaihtoreittien

oletetaan olevan suljettuna, kun kuivanapitolämmitys on käytössä. Jatkotutkimusta ja lisätarkasteluja tarvitaan siis myös sen suhteen, kuinka ilmanvaihto vaikuttaa tarvittavaan lämmitystehoon.

Mallissa pinta-alan vaikutus on otettu puutteellisesti huomioon. Pinta-alan vaikutusta voidaan tarkentaa esim. muokkaamalla kerrointa k_1 tai lisäämällä malliin uusi kerroin (k_3). Lisäksi mallissa oletetaan, että lämmitysteho on suoraan verrannollinen lämmityksellä tavoitellun lämpötilaeron suuruuteen. Todellisuudessa sisä- ja ulkoilman välisen lämpötilaeron kasvattaminen kasvattaa samalla myös vuotoilman lämpöhäviöitä. Tehokkaampi lämmitys kasvattaa sisä- ja ulkotilan välistä paine-eroa, mikä tehostaa ilmanvaihtoa. Suuremman lämpötilaeron ylläpitämiseen tarvitaan siis suhteessa suurempi lämmitysteho kuin pienemmän lämpötilaeron ylläpitämiseen, vaikka mallissa sitä ei ole otettu huomioon.

Mallin jatkojalostamiseen tarvitaan ennen kaikkea lisää mittaustietoa kuivanapitolämmitetyistä vapaa-ajan asuinnoista. Jotta lämmityksellä aikaansaatu lämpötilaero olisi helpompi selvittää, mittauksiin tulisi valita sellaisia koekohteita, jotka ovat mittausjakson ajan käyttämättömiä tai hyvin vähäisessä käytössä. Lisäksi koekohteiden ilmanvaihto tulisi olla joko kontrolloitua tai kokonaan suljettu, jolloin voitaisiin selvittää tarkemmin koekohteen ilmatiiviyden vaikutusta lämmitysenergiankulutukseen.

Lisäselvitystä vaatii myös se, kuinka todellinen on RakMK D5:ssa vuotoilman lämpöhäviöiden laskennassa käytetty vuotoilmanvaihtuvuus ($n_{50}/25$). Erityisesti jatkuvassa käytössä oleviin asuinrakennuksiin nähden huomattavasti pienemmällä lämmityksellä olevien vapaa-ajan asuntojen kohdalla kyseinen arvio voi olla kohtuuttoman suuri.

Johtopäätöksenä todettakoon, että nykyisessä muodossaan malli on hyvin karkea, mutta sitä voidaan silti hyödyntää ainakin arvioitaessa vapaa-ajan asunnolle asennettavan kuivanapitolämmityksen tehoa. Lämmitystehon määrittämistä mallin avulla tukee osaltaan myös se, että harvan vapaa-ajan asunnon ilmanpitävyyttä on mitattu, jolloin n_{50} -luvun arvoa 30 l/h vastaavien kerroinarvojen käyttö antaa useimmissa tapauksissa tarvittavaa lämmitystehoa suuremman arvion. Arviossa ollaan myös sitä enemmän varmallalla puolella, mitä suurempi on asunnon pohjapinta-ala. On myös huomattava, että yksinkertaisuutensa ja selkeytensä vuoksi malli sopisi laajempaan käyttöön myös kesämökkiläisille.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

6.1 Vakiotehoisen kuivanapitolämmityksen edut ja rajoitteet

Koska vakiotehoinen kuivanapitolämmitys pitää asunnon sisälämpötilan vain muutaman asteen ulkolämpötilaa korkeampana, sisälämpötila voi olla ajoittain pakkasella. Sen vuoksi kyseinen lämmitysratkaisu sopii sellaisenaan ainoastaan mökkeihin, joissa ei ole vesiputkia tai -kalusteita, joissa vesiputkia ja -kalusteita lämmitetään erikseen tai joissa nämä vesijärjestelmät tyhjenetään talven ajaksi.

Mikäli kodinkoneet, vesijärjestelmät ja -kalusteet sallivat, peruslämpö kannattaa muuttaa kuivanapitolämmitykseksi. Vapaa-ajan asunnon sisäolosuhteet voidaan pitää turvallisella tasolla myös kuivanapitolämmityksen avulla. Kuivanapitolämmityksellä ylläpidettävä hieman ulkolämpötilaa korkeampi sisälämpötila estää tehokkaasti sisätiloissa ja vaipparakenteissa olevien materiaalien homehtumista. Siirryttäessä perinteisestä peruslämmöstä kuivanapitolämmitykseen lämmitysenergian säästö voi olla jopa 50 %, mutta on myös otettava huomioon, että säästöpotentiaali riippuu useista eri tekijöistä (Rytkönen & Kirkkari 2010).

Lämmitysenergian ohella kuivanapitolämmityksellä voidaan säästää myös mökin rakenteita. Jossain tapauksissa peruslämpö saattaa kuivattaa mökin sisäilmaa tarpeettoman paljon ja lisäten esim. hirsien halkeilua. Lisäksi on otettava huomioon, että kuivanapitolämmitys on jatkuvasti päällä myös keväisin ja syksyisin, jolloin ulko-olosuhteet ovat homeen kasvun kannalta kriittisimmät. Keväisin ja syksyisin, kun ulkona on 5–15 astetta, peruslämpö on puolestaan sää-
tölämpötilastaan riippuen joko kokonaan pois päältä tai päällä ainoastaan ajoittain. (Vinha 2009)

Koska home ei kasva pakkasessa, lämmitystä voidaan talvella vähentää tai se voidaan katkaista kokonaan, elleivät kondensoitumis- tai muut kosteusriskit kasva. Jaksottaisen lämmityksen vaikutusta ei kuitenkaan selvitetty tarkemmin mm. rajallisten tutkimusresurssien vuoksi.

Vapaa-ajan asunnon käytön havaittiin myös vaikuttavan merkittävästi asunnon sisäolosuhteisiin. Vierailujen aikainen voimakas lämmittäminen parantaa hirsimökin sisäolosuhteita mm. hirsipintojen kuivumisen johdosta. Kuivumisvaikutus on sitä merkittävämpi, mitä enemmän lämmitetään ja mitä pidempään lämmittäminen kestää. Tuloksista havaittiin myös, että paljon käytetyssä ilmanpitävyydeltään tiiviissä mökissä olosuhteet voivat olla riittävän hyvät myös ilman lämmitystä ja jossain tapauksissa lämmittäminen saattaa kuivattaa sisäilmaa jopa liikaa ja aiheuttaa siten vahinkoa esim. hirsipintojen halkeilua.

Vapaa-ajan asuntoa ei siis ole tarvetta lämmittää ollenkaan, mikäli asunnon sisäolosuhteet ovat muuten riittävän hyvät ja mikäli asunnolla käytetyt vaipparakenteet toimivat hyvin myös lämmittämättömässä asunnossa. Vaikka lämmittäminen ei olisi välttämätöntä, se on suotavaa, sillä kuivanapitolämmitys parantaa tilannetta sisäolosuhteiden ja rakenteiden kannalta ja lisää asunnon käyttömukavuutta mm. pitäen vuodevaatteet ja muut tekstiilit kuivempina. Lisäksi kuivanapitolämmitys vähentää korkeisiin kosteuspitoisuuksiin liittyviä riskejä, joita ovat esim. rakenne- ja kalustemateriaalien ominaisuuksien heikentyminen, liimojen tartunnan heikentyminen, terästen ruostuminen sekä bakteerikasvun lisääntyminen (Vinha 2007). Kuivanapitolämmityksessä pitää kuitenkin muistaa, että satunnaisesti mökkeiltäessä sisälämpötilaa joudutaan nostamaan merkittävästi enemmän kuin peruslämmöllä olevassa mökissä

Kosteuden kondensoitumisen kannalta kriittisimmät kohdat ovat yleensä asunnon ikkunapinnat. Vakiotehoisella kuivanapitolämmityksellä, joka toteutetaan keskelle rakennusta sijoitetulla lämmityspatterilla, on kuitenkin vain vähäinen vaikutus ikkunapintojen olosuhteisiin. Sen vuoksi kuivanapitolämmityksen toteuttaminen, esim. ennestään olemassa olevilla, ikkunoiden edustalle sijoitetuilla lämmityspattereilla on yleensä parempi vaihtoehto. Erillisten patterien hankinta ei siis ole välttämätöntä. Mikäli mökki on kaksikerroksinen, ylä- ja alakerrassa kannattaa lisäksi käyttää omia pattereita, jotta lämpö jakaantuisi tasaisemmin. Myös siinä tapauksessa, mikäli mökin pohjaratkaisu on kovin sokkeloinen, kannattaa käyttää useampia pienempiä pattereita yhden tehokkaamman patterin sijasta.

6.2 Kuivanapitolämmityksellä tavoiteltava lämpötilaero

Tuloksia tarkasteltaessa on otettava huomioon, että kenttämittaukset koskevat ainoastaan lisäeristämättömiä massiivihirsirakenteisia vapaa-ajan asuntoja. Tuloksia ei siten voida täysin soveltaa esim. puurankarakenteisiin tai sisäpuolelta lisäeristettyihin hirsirakenteisiin vapaa-ajan asuntoihin, koska näissä tapauksissa seinien sisäpinnan lämmön- ja kosteudensitomiskyky voi poiketa merkittävästi lisäeristämättömistä hirsirakenteista. Puurankarakenteiset seinät ja sisäpuolelta lisäeristetyt hirsiseinät ovat lisäksi kerroksellisia rakenteita, joiden kosteustekninen toiminta on massiivihirsiseiniin nähden erilainen. Toisaalta tehtyjen laskentatarkastelujen perusteella näyttäisi siltä, että 3 °C:n lämpötilaero olisi yleensä riittävä myös näissä tapauksissa.

Massiivihirsirakenteisten vapaa-ajan asuntojen sisäolosuhteet eivät näytä olevan vielä nykyisessä ilmastossa sellaisia, että asunnon lämmittäminen olisi välttämätöntä, mutta rakenteiden toimivuus saattaa edellyttää lämmittämistä. Lämmittämättömien asuntojen sisäolosuhteet eivät ole homehtumisen suhteen kriittisiä mm. alhaisten sisälämpötilojen johdosta. Sisätilojen olosuhteet ovat usein sitä paremmat, mitä parempi on rakennusvaipan lämmöneristävyys ja ilmanpitävyys.

Tarkastelujen perusteella vapaa-ajan asunnon alapohjarakenne määrää asunnon lämmitystarpeen suuruuden. Ryömintätilaiset alapohjat ovat homehtumisen kannalta kriittisimmät, koska maa viilentää ryömintätilaa ja tuottaa sinne kosteutta. Ryömintätilan olosuhteet ovat sitä kriittisemmät, mitä heikommin tila pääsee tuulettumaan. Heikosti tuulettuvilla ryömintätilaisilla alapohjilla varustetuissa mökeissä lämpötilaeron tulisikin olla 5 °C. Jotta maan vaikutus ei olisi niin merkittävä, maapohja on suositeltavaa lämpöeristää kauttaaltaan. Lisäksi ryömintätilaisissa alapohjissa tulisi käyttää kohtalaisen läpäiseviä höyrynsulkumateriaaleja, jotta alapohjan läpi sisäänpäin siirtyvä kosteus ei kertyisi höyrynsulun ulkopintaan. Höyrynsulun on kuitenkin ehdottomasti oltava ilmatiivis, jotta ryömintätilassa mahdollisesti olevat homeitiöt pääsisi sisätiloihin.

Mikäli asunnossa on heikosti tuulettuva (esim. yhtenäisen sokkelin varaan rakennettu) ryömintätilainen alapohja ja rakenteessa on käytetty tiivistä höyrynsulkua, kuten muovikalvoa, muovitiivistyspaperia tai lakattua laualattiaa, sisätiloissa tulee olla erityisesti syksyllä ja keväällä noin viisi astetta lämpimämpää kuin ulkona. Kolmen asteen lämpötilaero riittää siinä tapauksessa, että rossipohjan sisäpinta läpäisee vesihöyryä. Tällöin rakenteessa tulee olla käytetty riittävän läpäisevää höyrynsulkua, esim. bitumipaperia, ja puulattian tulee olla pinnoitettu vesihöyryä läpäisevällä tuotteella. Jos rakenteesta tai lattiapinnoitteesta ei ole varmuutta, kuivanapitolämmityksessä kannattaa valita syys- ja kevätaikaan viiden asteen lämpötilaero.

Yläpohjan, maanvaraisella lämmöneristetyllä betonilaatalla toteutetun alapohjan sekä hyvin tuulettuvan ryömintätilaisen (esim. pilariperusteisen) alapohjan toimivuus ei edellytä asunnon lämmittämistä vielä nykyisissä ilmasto-olosuhteissa riippumatta siitä, millaista höyrynsulku-materiaalia näissä rakenteissa on käytetty. Lämmittäminen, ylläpitämällä esim. 3 °C:n lämpötilaeroa, parantaa tosin myös näiden rakenteiden toimivuutta. Pilariperusteisen alapohjan kohdalla hyvä tuulettuvuus edellyttää, ettei ryömintätilan ilmanvaihtoa ole heikennetty esim. varastoimalla ryömintätilaan tai peruspilarien väliin polttopuita. Alapohja saattaa tarvita lämmitystä lisäksi, jos maapohja on todella kostea tai jos maapinnassa on monttu, johon vesi jää makaamaan.

Jos asunnolla käytetyt rakennetyypit ja -ratkaisut eivät edellytä asunnon lämmittämistä, on myös varmistettava, että nämä rakenteet ovat toteutettu oikein ja nykymääräysten mukaisesti ja ettei niissä esiinny esim. edellä kuvattuja puutteita tai virheitä. Esimerkiksi yläpohjassa tuuletusraon tulee olla riittävän suuri ja yhtenäinen ja maanvaraisen betonilaatan lämmöneristys tulee olla ehdottomasti laatan alapuolella.

Jos yläpohja tai alapohja on tehty jotenkin väärin tai puutteellisesti, silloin vähäinen lämmitys voi edesauttaa niiden toimintaa lämmittämättömänä pitämiseen nähden. Tällöin sisä- ja ulkoilman välille suositellaan vähintään kolmen asteen lämpötilaeroa. Toisaalta on myös huomattava, että tarkasteluja tehtiin ainoastaan tyypillisimmille nykymääräisten mukaan oikeaoppisesti toteutetuille ja avohuokoisilla lämmöneristeillä eristetyille ylä- ja alapohjarakenteille. Erityisesti vanhemmissa vapaa-ajan asunnoissa saattaa kuitenkin esiintyä rakenteita, jotka eivät ole toimivia, vaikka asuntoa lämmitettäisiin kuinka paljon tahansa. Tyypillinen vakava rakennusvirhe on rakentaa lämpöeristetty puulattia betonilaatalle, jonka alapuolella ei ole lämmöneristystä. Rakenne on altis home- ja lahovaurioille riippumatta lämmityksen suuruudesta.

Kuivanapitolämmityksen vaatima lämmitysteho riippuu mm. lämmöneristyksestä, ilmanpitävyydestä ja ilmanvaihdosta. Raportissa esitettyä lämmitystehon määrittämisessä käytettävää mallia (ks. kohta 5.2) voidaan hyödyntää arvioitaessa lämmitystehon suuruutta. Yksinkertaista ja helpokäyttöistä mallia, joka ottaa huomioon tavoiteltavan lämpötilaeron, asunnon mittasuhteet ja rakennusvaipan ominaisuudet, voidaan pitää riittävän tarkkana. Mallin mukaan noin kolmen asteen lämpötilaero edellyttää 5–10 W:n lämmitystehoa asuineliötä kohden. Esimerkiksi 50 neliön mökkiin tarvitaan siis 250–500 W lämmitysteho.

Mallin mukaista lämmitystehoa käytettäessä on muistettava, että asunnon ilmanvaihto tulisi olla suljettuna käyttöajan ulkopuolella, lukuun ottamatta kevättä. Sen lisäksi, että ilmanvaihdon sulkeminen pienentää asunnon lämmitysenergiankulutusta, sen havaittiin vaikuttavan suotuisasti massiivihirsimökkien kosteusolosuhteisiin mm. hidastamalla sisäilman ja -tilojen kostumista. Ilmanvaihto voidaan pitää suljettuna loppukesällä, syksyllä ja talvella, sillä sisäilmassa on tuolloin pääsääntöisesti vähemmän kosteutta kuin ulkoilmassa. Ilmanvaihdon tulisi taas olla avoinna asunnon ollessa käytössä sekä keväällä, jolloin sisäilma on yleensä ulkoilmaa kosteampaa.

6.3 Kuivanapitolämmityksen eri toteuttamistavat

Kuten aiempaan on todettu, tutkimuksessa tarkastellun vakiotehoisen kuivanapitolämmityksen käyttö on rajattu vapaa-ajan asuntoihin, joissa alhaiset sisälämpötilat eivät ole vahingollisia. Kuivanapitolämmitystä on kuitenkin mahdollista varioida ja kehittää siten, että se soveltuisi useampiin kohteisiin ja jopa ns. kakkosasuntoihin, joiden laatu- ja varustetaso on usein hyvin korkea. Tässä tutkimuksessa eri toteutusratkaisuja, joista muutama on mainittu seuraavassa, ja niiden toimintaa ei ollut kuitenkaan mahdollista tutkia tarkemmin.

Yksi vaihtoehto kuivanapitolämmityksen käytölle on yhdistää peruslämpö ja kuivanapitolämmitys ja pitää peruslämmön avulla asunnon sisälämpötila jatkuvasti halutun lämpötila-alarajan yläpuolella. Yhdistettäessä nämä lämmitysratkaisut peruslämmön säätölämpötila ja kuivanapitolämmityksen teho tulee kuitenkin asettaa riittävän alhaiseksi, jottei sähkönkulutus kasvaisi entisestään. Tämä ratkaisu olisi peruslämpöön nähden parempi erityisesti kevät- ja syysaikaan. Peruslämmön sijasta kuivanapitolämmityksen rinnalla voidaan nykyään käyttää yhtä hyvin myös lämpöpumppua.

Toinen tutkimuksen yhteydessä ilmennyt ratkaisu on pitää peruslämmöllä ainoastaan yksittäistä tilaa, johon sijoitetaan alhaisten lämpötilojen suhteen kriittiset kalusteet ja kokonaisuudet. Tällöin lämmitetty tila, esim. pesuhuone, toimisi tavallaan rakennuksen kuivanapitolämmityksenä tilan lämpöhäviöiden lämmittäessä muita tiloja. On toki huomattava, että tällaisen lämmitysjärjestelyn toteuttaminen voi olla haasteellista, ellei vesikalusteiden ja -järjestelmien sijoitusta ole otettu huomioon jo asunnon suunnitteluvaiheessa. Lisäksi peruslämmöllä oleva tila olisi järkevä sijoittaa keskelle asuntoa, jotta suurin osa tilan lämpöhäviöistä saataisiin hyödynnetyksi.

Kuivanapitolämmitystä on mahdollista kehittää älykkääksi sisä- ja ulkoilmaolosuhteiden perusteella toimivaksi järjestelmäksi, johon liitettäisiin myös ilmanvaihdon ohjaus. Lämmitys voitaisiin ohjelmoida toimimaan esim. sisäilman suhteellisen kosteuden perusteella ja käyttöajan ulkopuolella ilmanvaihto voitaisiin kytkeä päälle aina, kun sisäilman vesihöyrypitoisuus olisi suurempi kuin ulkoilmassa. Tällöin ilmanvaihto pienentäisi sisäilman kosteuspitoisuutta, mutta jossain määrin se myös lisäisi lämmitysenergiankulutusta. Lämmitysenergian minimoimiseksi ilmanvaihtoa voitaisiin osittain ohjata myös sisä- ja ulkolämpötilojen mukaan ja kytkeä ilmanvaihto päälle, kun ulkoilma olisi sisäilmaa lämpimämpää. Tällöin olisi kuitenkin oltava varmuus siitä, ettei tuloilman mukana sisätilaan tuotaisi ylimääräistä kosteutta, josta osa saattaisi tiivistyä esim. tuloilmaa viileämmille sisäpinnoille.

6.4 Jatkotutkimustarve

Kuivanapitolämmityksen eri toteutusratkaisut ja raportissa esitetty lämmitystehon määrittämisessä käytettävä malli vaatii jatkokehittämistä. Yksinkertaisuutensa ja selkeytensä vuoksi malli on käyttökelpoinen, mutta sen tarkkuudesta ei ole vielä riittävästi tietoa. Jatkotutkimuksessa tulisi olla mukana huomattavasti enemmän koekohteita, jotta mallin kelpoisuudesta oltaisiin varmempia ja jotta mallia ja sen kertoimia voitaisiin tarvittaessa hienosäätää.

Jotta tutkittu vakiotehoinen kuivanapitolämmitys voitaisiin ottaa tehokkaasti käyttöön koko mökkikannassa, tarvitaan tutkimusta hirsirakenteisten vapaa-ajan asuntojen lisäksi myös ulko-seinärakenteiltaan erilaisten asuntojen sisäolosuhteista ja kuivanapitolämmityksen soveltuvuudesta tällaisiin kohteisiin. Potentiaalisia tutkimuskohteita ovat mm. vapaa-ajan asunnot, joiden

ulkoseinät ovat puurankarunkoisia ja toteutettu erityyppisillä lämmöneristeillä. Jotta lämmityksen toiminnasta ja sen riskittömyydestä saataisiin luotettavampi kuva, tulisi kenttämittausten avulla selvittää myös ala- ja yläpohjan todellisia lämpö- ja kosteusolosuhteita sekä erilaisten rakennusteknisten virheiden ja puutteiden vaikutusta vaipparakenteiden toimintaan. Tutkimusta tarvitaan erityisesti heikosti tuulettuvien ryömintätilaisten alapohjien osalta. Selvitystä vaatii myös se, miten mahdollinen ilmastomuutos tulisi vaikuttamaan vapaa-ajan asuntojen sisäolosuhteisiin ja asuntojen vaipparakenteiden kosteustekniseen toimivuuteen. Myös virheellisesti toteutettuja rakenteita pitäisi katsoa tarkemmin, sillä aiempina vuosikymmeninä rakennetuissa mökeissä on luonnollisesti useita rakenneratkaisuja, jotka eivät ole nykymääräysten ja -ohjeiden mukaisia ja kosteusteknisesti turvallisia.

Jotta lämmitystä voitaisiin optimoida ilman että kosteusriskit kasvavat, tutkimusta tarvitaan myös ilmanvaihdon merkityksestä sekä jaksottaisen lämmityksen ja lämmityksen tilapäisen katkaisemisen vaikutuksista asunnon ja sen rakenteiden kosteustekniseen toimintaan. Ilmanvaihdon osuutta voitaisiin tutkia esim. samoissa koekohteissa peräkkäisinä vuosina suoritettavilla kenttämittauksilla. Yhtenä talvena ilmanvaihtoreittejä voitaisiin pitää käyttöajan ulkopuolella avoinna tai osittain suljettuna (esim. asunnon omistajan käyttämän tavan mukaisesti) ja toisena talvena kaikki ilmanvaihtoreitit suljettaisiin kokonaan. Jotta vuotoilmanvaihdon suuruudesta saataisiin todellisuutta vastaava käsitys, koekohteiden vuotoilmaluvut tulisi mitata myös siinä tilassa, jossa näitä kohteita pidetään käyttöajan ulkopuolella. Toisin sanoen ne ilmanvaihtoreitit, joita ei suljeta esim. talven ajaksi, tulisi olla avoinna myös tässä ns. epävirallisen ilmapuotoluvun määrittämisessä. Vuotoilmanvaihdon merkityksen arvioimiseksi tulisi lisäksi selvittää koekohteiden sisä- ja ulkotilan väliset keskimääräiset painesuhteet.

Peruslämmön korvaaminen kuivanapitolämmityksellä sekä sähkölämmityksen ja -tehon hallinta voivat parantaa koko valtakunnan sähkövoimajärjestelmän toimintamahdollisuuksia erityisesti kovimpien talvipakkasten aikaisissa huippukuormitus-/ tehonvajaustilanteissa. Lämmitystarpeen optimointiin soveltuvat esim. älykkäät seuranta- ja ohjausjärjestelmät, joihin voidaan tarvittaessa liittää myös etäkäyttömahdollisuus. Jatkotutkimuksen avulla tulisi selvittää myös kuivanapitolämmityksen soveltuvuus maatalous- ja varastorakennuksiin, valvonta- ja mittausasemiin sekä muihin väliaikaisesti tyhjillään oleviin rakennuksiin.

Kuivanapitolämmityksen jatkokehittäminen synnyttää uusia lämmitysteknisiä ratkaisuja ja uutta liiketoimintaa, joka on laajennettavissa myös kansainvälisille markkinoille. Lisätutkimuksen myötä home- ja kosteusvaurioiden torjuntaan käytettävää kuivanapitolämmitystä voidaan soveltaa vapaa-ajan asuntojen lisäksi myös moniin muihin erityyppisiin rakennuksiin. Kuivanapitolämmitys on jo herättänyt laajaa mielenkiintoa, mikä osoittaa tarpeen olemassaolon ja luo hyvät liiketoimintaedellytykset.

LÄHTEET

- Aho, H. & Korpi, M. (toim.) 2009. Ilmanpitävien rakenteiden ja liitosten toteutus asuinrakennuksissa. Tampereen teknillinen yliopisto, Talonrakennustekniikka, Tutkimusraportti 141. Tampere. 100 s.
- Hukka, A., Viitanen, H. A. 1999. A mathematical model of mould growth on wooden material. *Wood Science and Technology*, Vol. 33, pp. 475-485.
- Ilmatieteen laitos 2010. Internetsivut. http://www.fmi.fi/ilmastonmuutos/suomessa_18.html. Viittaus 1.9.2010.
- Korpi, M., Vinha J., Kurnitski J. 2007. Pientalojen ja kerrostaloasuntojen ilmanpitävyys. *Rakennusfysiikka 2007*, Uusimmat tutkimustulokset ja hyvät käytännön ratkaisut 18.–19.10.2007. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos. Tampere. s. 253–260.
- Kotitalouksien sähkönkäyttö 2006. Tutkimusraportti. Adato Energia Oy. Helsinki 2008. 50 s. + 22 liites. http://www.motiva.fi/files/1353/Kotitalouksien_sahkonkaytto_2006_-raportti.pdf. Viittaus 1.9.2010.
- Kurnitski, J. 2000. Humidity control in outdoor-air-ventilated crawl spaces in cold climate by means of ventilation, ground covers and dehumidification. Doctoral thesis, Helsinki University of Technology, Report A3. Espoo. 180 p.
- Princes Risborough Laboratory 1969. The movement of timbers. Technical Note No. 38. 1969. Revised 1982.
- Rytkönen A. & Kirkkari A.-M. (toim.) 2010. Vapaa-ajan asumisen ekotehokkuus. Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto, Suomen ympäristö 6/2010. Helsinki. 122 s.
- Seppänen O. 2001. Rakennusten lämmitys. 2. päivitetty painos. Suomen LVI-yhdistysten liitto ry. Jyväskylä. 444 s.
- SFS-SN 13829 2000. Thermal performance of buildings. Determination of air permeability of buildings. Fan pressurization method (ISO 9972:1996, modified). Suomen standardisoimisliitto SFS ry. 23 p.
- Energiatilasto. Vuosikirja 2008. Tilastokeskus. SVT Energia. Helsinki 2009. 152 s.
- Vinha, J., Korpi, M., Kalamees, T., Eskola, L., Palonen, J., Kurnitski, J., Valovirta, I., Mikkilä, A. & Jokisalo, J. 2005a. Puurunkoisten pientalojen kosteus- ja lämpötilaolosuhteet, ilmanvaihto ja ilmatiiviys. Tampereen teknillinen yliopisto, Talonrakennustekniikan laboratorio, Tutkimusraportti 131. Tampere. 102 s. + 10 liites.
- Vinha J., Valovirta I., Korpi, M., Mikkilä A., Käkelä, P. 2005b. Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja kosteuden funktiona. Tampereen teknillinen yliopisto, Talonrakennustekniikan laboratorio, Tutkimusraportti 129. Tampere. 101 s. + 211 liites.

Vinha, J. 2007. Hygrothermal Performance of Timber-Framed External Walls in Finnish Climatic Conditions: A Method for Determining the Sufficient Water Vapour Resistance of the Interior Lining of a Wall Assembly. Doctoral thesis, Tampere University of Technology, Publication 658. Tampere. 338 p. + app. 10 p.

Vinha, J., Lindberg, R., Pentti, M., Mattila, J., Lahdensivu, J., Heljo, J., Suonketo, J., Leivo, V., Korpi, M., Aho, H., Lehdesmäki, K. & Aaltonen, A. 2008. Matalaenergiarakenteiden toimivuus, Tutkimustuloksia ja suosituksia uusiin lämmöneristys- ja energiankulutusmääräyksiin ja ohjeisiin. Loppuraportti. Tampereen teknillinen yliopisto, Talonrakennustekniikka, Tutkimusselostus nro TRT/1706/2008, Tampere. 88 s.

Vinha, J., Korpi, M., Kalamees, T., Jokisalo, J., Eskola, L., Palonen, J., Kurnitski, J., Aho, H., Salminen, M., Salminen, K. & Keto, M. 2009. Asuinrakennusten ilmanpitävyys, sisäilmasto ja energiatalous. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Tutkimusraportti 140. Tampere. 148 s. + 19 liites.

Vinha, J. 2009. Kuivanapito hakkaa peruslämmön. Meidän Mökki, 8/2009. s. 66–67.

Vinha J., Viitanen H., Lähdesmäki K., Peuhkuri R., Ojanen T., Salminen K., Paajanen L., Strander T. & Iitti H. Rakennusmateriaalien ja rakenteiden homehtumisriskin laskennallinen arviointi. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Rakennetekniikka, Tutkimusraportti. Julkaistaan 2010.

RakMK C4. 2003. Lämmöneristys. Ohjeet 2003. Suomen rakentamismääräyskokoelma, Helsinki, Ympäristöministeriö. 24 s.

RakMK D5. 2007. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. Ohjeet 2007. Suomen rakentamismääräyskokoelma, Helsinki, Ympäristöministeriö. 72s.

LIITTEET

Liite 1 Lämpötila- ja kosteusmittausten tulokset koekohteittain

Liite 2 Lämmitystehon laskentamallin kerroinarvojen ja oletustehon määrittäminen